

## TRABAJO FINAL DE GRADO

**Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática**

# DISEÑO DE UNA CÉLULA ROBOTIZADA DIDÁCTICA



## Memoria y Anexos

**Autor:** Arnau Barbecho Barrado  
**Director:** Sebastian Tornil Sin  
**Convocatoria:** Junio de 2020



## Resumen

En el presente trabajo se expone y se detalla el diseño de una célula robotizada para usos docentes, cuyo elemento principal es un robot articulado Mitsubishi RV-2AJ y una cinta transportadora equipada con dos sensores de presencia. Paralelamente, se realiza un estudio de las diferentes normativas de seguridad ISO aplicadas a los sistemas robóticos dentro del marco de la Unión Europea, y se explica su implementación dentro del diseño realizado. Asimismo, se analiza todas las posibilidades que ofrecen el robot RV-2AJ y su controlador CR1-571, y se establecen los medios disponibles para su interconexión con elementos externos. En relación a esto, se determina que la interfaz de conexión que incorpora el robot no es práctica, y se presenta el diseño de una pequeña placa de circuito impreso (PCB) que permite el conexionado directo del robot con otros elementos externos como sensores y/o actuadores. Respecto al diseño de la celda, se especifican el conexionado e integración de los diferentes elementos del sistema de seguridad, el cual se basa en protecciones fijas, dispositivos de detección, relés de seguridad y un PLC. Finalmente, se presenta un diseño 3D de cómo quedaría toda la instalación, así como los materiales que harán falta para su montaje.

## Resum

En el present treball s'exposa i es detalla el disseny d'una cèl·lula robotitzada per a usos docents, en què l'element principal és un robot articulats Mitsubishi RV-2AJ i una cinta transportadora equipada amb dos sensors de presència. Paral·lelament, es realitza un estudi de les diferents normatives de seguretat ISO aplicades als sistemes robòtics dins el marc de la Unió Europea, i s'explica la seva implementació dins del disseny realitzat. Així mateix, s'analitzen totes les possibilitats que ofereixen el robot RV-2AJ i el seu controlador CR1-571, i s'estableixen els mitjans disponibles per la seva interconnexió amb elements externs. En relació amb això, es determina que la interfície de connexió que incorpora el robot no és pràctica, i es presenta el disseny d'una petita placa de circuit imprès (PCB) que permet la connexió directa del robot amb altres elements externs com sensors i/o actuadors. Respecte al disseny de la cel·la, s'especifiquen les connexions i integració dels diferents elements del sistema de seguretat, el qual es basa en proteccions fixes, dispositius de detecció, relés de seguretat i un PLC. Finalment, es presenta un disseny 3D de com quedaria tota la instal·lació, així com els materials que faran falta pel seu muntatge.

## **Abstract**

In this thesis, the design of a robotic cell for educational uses is exposed and detailed, in which the main element is an articulated robot Mitsubishi RV-2AJ and a conveyor with two presence sensors. At the same time, a study of the different ISO security standards applied to robotic system is made according to the framework of the European Union, and their implementation in the design is explained. Also, all the possibilities offered by the RV-2AJ robot and its CR1-571 controller are analyzed, and the connection methods for its interconnection with external devices are established. In relation to this fact, it is determined that the connection interface of the robot is not practical, and for this reason, the design of a small printed circuit board (PCB) that allows direct connections of the robot with other external elements such as sensors and actuators is presented. Regarding to the design of the cell, the connection and integration of the different elements of the security system are specified, which is based on fixed protections, detection devices, safety relays and a PLC. Finally, a 3D design of the cell is presented, as well as the materials that will be needed for its assembly.



## Agradecimientos

*En primer lugar me gustaría agradecer todo el apoyo prestado por el director de este trabajo, Sebastian Tornil, que me ha ayudado a organizar el trabajo y me ha prestado ayuda siempre que la he necesitado. Por otro lado, también le quiero agradecer la implicación en este trabajo y en su replanteamiento, y más, pensando en las circunstancias de no presencialidad provocadas por la pandemia del COVID-19.*

*También me gustaría agradecer el soporte, tanto emocional como económico, realizado por mi familia durante estos años y especialmente durante estos últimos meses, en los cuales se ha juntado el desarrollo del trabajo con el confinamiento.*

*Por último, agradecer a mis amigos los ratos de diversión y de despeje aportados durante el trabajo, ya que esos momentos me han servido para recargar pilas y coger ánimo.*





## Glosario

### ***Sobre los espacios de la celda*** (según UNE-ISO 10218-1:2012 y UNE-ISO 10218-2:2011)

- **Espacio de seguridad:** espacio definido por el perímetro de seguridad.
- **Espacio máximo:** espacio que puede ser alcanzado por los componentes móviles del robot, tal y como lo define el fabricante, más el espacio que puede ser alcanzado por el elemento terminal del robot y pieza de trabajo.
- **Espacio restringido:** parte del espacio máximo que se encuentra restringido por dispositivos de limitación en el espacio que no pueden ser sobrepasados.
- **Espacio operativo:** parte del espacio restringido que se utiliza mientras se desarrollan los movimientos comandados por el programa de tareas.

### ***Sobre las partes de los sistemas de mando relativas a seguridad*** (según UNE-ISO 13849-1:2016)

- **SRP/CS:** parte de un sistema de mando que responde a señales de entrada y genera señales de salida relativas a seguridad.
- **Función de seguridad:** función de una máquina cuyo fallo podría dar lugar a un aumento inmediato de los riesgos.
- **Categoría de estructura:** Clasificación de las partes de un sistema de mando relativas a la seguridad en función de su resistencia a defectos y de su comportamiento subsecuente en caso de defecto, y que se obtiene mediante la arquitectura de dichas partes, la detección de defectos y/o su fiabilidad.
- **PL:** nivel de prestaciones aplicado con el fin de conseguir la reducción de riesgo requerida para cada función de seguridad, entendiendo prestaciones como la aptitud de las SRP/CS para desempeñar una función de seguridad en condiciones previsibles.
- **DC<sub>avg</sub>:** medida de la efectividad del diagnóstico, que se puede determinar como la relación entre la tasa de fallo de los fallos peligrosos detectados y la tasa de fallo del total de fallos peligrosos.
- **MTTF<sub>D</sub>:** valor probable de la duración media hasta el fallo peligroso.

### ***Sobre los equipos de protección sensible***

- **ESPE:** equipo de protección electrosensible.
- **AOPDDR:** dispositivo de protección optoelectrónico activo sensible a las reflexiones difusas.
- **OSSD:** salida de seguridad, señal de salida que tiene un funcionamiento de seguridad especificado y suficiente.
- **EDM:** monitoreo de dispositivos externos.

***Sobre el posicionamiento de los protectores*** (según UNE-ISO 13855:2011)

- **Tiempo total de respuesta,  $T$ :** intervalo de tiempo transcurrido entre la activación de la función de detección y la interrupción de la función peligrosa de la máquina.
- **Capacidad de detección,  $d$ :** límite del parámetro de la función de detección especificado por el proveedor, que da lugar a la activación del equipo de protección.
- **Distancia mínima,  $S$ :** distancia calculada entre el protector y la zona peligrosa, necesaria para impedir que una persona, o una parte de una persona, alcance la zona peligrosa antes de que se interrumpa la función peligrosa de la máquina
- **Distancia de intrusión,  $C$ :** distancia que una parte del cuerpo, puede recorrer más allá del protector hacia la zona peligrosa, antes de la activación del protector.
- **Velocidad de aproximación,  $K$ :** parámetro de la velocidad de aproximación de una persona a una zona de detección cualquiera.

# Índice

<b>RESUMEN</b>	<b>I</b>
<b>RESUM</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>V</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>VII</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Origen del trabajo .....	1
1.2. Objetivos del trabajo.....	1
1.3. Alcance del trabajo .....	2
<b>2. ROBOTS INDUSTRIALES Y CELDAS ROBOTIZADAS</b>	<b>3</b>
2.1. ¿Qué es un robot industrial? .....	3
2.2. Integración de robots. Celdas Robotizadas. ....	4
<b>3. NORMATIVAS REFERENTES A ROBÓTICA</b>	<b>6</b>
3.1. UNE-ISO 10218. Robots y celdas robóticas .....	6
3.1.1. UNE-ISO 10218-1:2012.....	7
3.1.2. UNE-ISO 10218-2:2011.....	7
3.2. ISO/TS 15066:2016. Robots colaborativos .....	7
3.3. Tipos de norma e interrelación.....	8
<b>4. SISTEMA ROBÓTICO DEL LABORATORIO</b>	<b>10</b>
4.1. Robot Mitsubishi RV-2AJ.....	10
4.2. Controlador Mitsubishi CR1-571 .....	12
4.2.1. Lenguaje de programación. MELFA-BASIC IV .....	13
4.2.2. Entradas y salidas (E/S) externas.....	14
4.2.3. Entradas y salidas (E/S) de seguridad.....	16
4.2.4. Otras comunicaciones .....	18
4.3. Sistema de trabajo adjunto al robot.....	19
<b>5. DISEÑO DE LA INTERFAZ DE CONEXIÓN CON LAS E/S DEL ROBOT</b>	<b>20</b>
5.1. Requisitos de la interfaz.....	20
5.2. Pin layout del conector SCSI .....	21

5.2.1.	Especificaciones eléctricas del conector.....	22
5.3.	Diseño eléctrico de la interfaz .....	23
5.3.1.	Esquema eléctrico de las conexiones de la placa.....	23
5.3.2.	Elección de los componentes de la placa .....	24
5.4.	Diseño del <i>layout</i> de la PCB .....	26
5.5.	Resultado final del diseño de la interfaz .....	28
5.5.1.	Obtención de la placa a partir del diseño.....	28
5.5.2.	Aspectos del diseño a comentar.....	29
5.5.3.	Modelo 3D de la interfaz diseñada.....	29
<b>6.</b>	<b>DISEÑO DEL SISTEMA DE SEGURIDAD DE LA CELDA.....</b>	<b>30</b>
6.1.	Requisitos del sistema de seguridad .....	30
6.2.	Limitación del movimiento del robot y vallado perimetral .....	31
6.2.1.	Requisitos a cumplir según la norma UNE-ISO 10218-2:2011 .....	31
6.2.2.	Identificación de los espacios de la celda a diseñar .....	32
6.2.3.	Limitación de movimiento del robot .....	34
6.2.4.	Protección y vallado perimetral de las zonas no accesibles.....	37
6.3.	Normativa y estructura del sistema de control de seguridad .....	39
6.3.1.	Requisitos a cumplir según la norma UNE-ISO 13849-1:2016 .....	40
6.4.	Equipos de protección sensible (SRP/CS <sub>a</sub> ) .....	42
6.4.1.	Equipo de protección para el acceso latera: cortina fotoeléctrica .....	42
6.4.2.	Equipo de protección para el acceso frontal: alfombras y escáneres láser .....	44
6.5.	Dispositivos de lógica y tratamiento de señales (SRP/CS <sub>b</sub> ).....	47
6.5.1.	Relés de seguridad .....	48
6.5.2.	PLC de propósito general: Siemens Simatic S7-1200 .....	50
6.6.	Conexión de las partes del sistema SRP/CS <sub>a</sub> y SRP/CS <sub>b</sub> .....	51
<b>7.</b>	<b>INTEGRACIÓN DEL SISTEMA DE SEGURIDAD EN EL ROBOT .....</b>	<b>54</b>
7.1.	Funcionalidades del sistema de seguridad .....	54
7.1.1.	Funciones de seguridad según la norma UNE-ISO 10218-2:2011 .....	54
7.1.2.	Funciones de seguridad para la celda del laboratorio .....	55
7.2.	Conexión de la celda de seguridad con el robot.....	56
7.2.1.	Conexión de la cortina fotoeléctrica. E/S dedicadas.....	57
7.2.2.	Conexión del escáner láser. E/S de seguridad.....	59
7.3.	Otras conexiones del sistema y alimentación.....	61
7.3.1.	Señalización lumínica del estado de la celda.....	61
7.3.2.	Conexión de los elementos del sistema de trabajo adjunto.....	62

7.3.3. Fuente de alimentación del sistema .....	64
7.4. Funcionalidades y programación del PLC.....	65
7.4.1. Programación del PLC.....	66
7.5. Disposición y configuración de los equipos de protección sensible .....	68
7.5.1. Requisitos a cumplir según la norma UNE-ISO 10218-2:2011.....	68
7.5.2. Disposición de la cortina fotoeléctrica .....	69
7.5.3. Disposición y configuración del escáner láser.....	72
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>77</b>
<b>PRESUPUESTO Y/O ANÁLISIS ECONÓMICO .....</b>	<b>79</b>
Costes de materiales y componentes utilizados .....	79
Desglose de las horas invertidas y costes de ingeniería. ....	80
Presupuesto total del proyecto .....	81
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>82</b>
Normativas y fuentes documentales .....	82
Hojas de especificaciones y manuales de los dispositivos .....	86
<b>ANEXO A. PROTOCOLOS DE ACTUACIÓN PARA LA CELDA .....</b>	<b>89</b>
<b>ANEXO B. TABLA RESUMEN DE LA NORMATIVA APLICADA .....</b>	<b>91</b>
<b>ANEXO C. CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN DEL PLC .....</b>	<b>93</b>
<b>ANEXO D. ESQUEMAS ELÉCTRICOS DE LA CELDA DISEÑADA .....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXO E. PLANOS DE LA CELDA 3D DISEÑADA .....</b>	<b>101</b>



# 1. Introducción

## 1.1. Origen del trabajo

Este trabajo nace de la necesidad de disponer de una celda robotizada didáctica para el laboratorio de automatización y robótica industrial, que ilustre los diferentes sistemas de seguridad existentes para este tipo de máquinas. Como bien es sabido, las seguridades dentro de la automatización son muy importantes, tema que por falta de tiempo y temarios muy extensos, no se puede acabar de ver en las asignaturas relacionadas con la automática y la robótica. Esto hace que los alumnos graduados no tengan una visión de las seguridades proporcional a su importancia dentro de la industria, y que por lo tanto, la formación más básica en estos aspectos la deban adquirir en prácticas externas o en su etapa laboral. Por ello, la necesidad de una celda didáctica en el laboratorio, que permita al profesorado de la asignatura de Robótica industrial y visión por computador explicar o ejemplificar los aspectos más básicos relacionados con la seguridad.

En años anteriores, ya se dispuso de una celda de este tipo, pero debido a falta de documentación y a diferentes traslados, no se pudo mantener. Por este motivo, y considerando que la ubicación actual del sistema robótico será fija, se decidió que era el momento oportuno para diseñar otra celda de estas características.

## 1.2. Objetivos del trabajo

El objetivo principal de este trabajo es el diseño de una celda robotizada para el laboratorio A5.4 de la escuela. Su elemento principal será un pequeño robot articulado Mitsubishi RV-2AJ que trabajará con una cinta transportadora equipada con dos sensores de presencia, uno al principio y otro al final. Todo ello deberá ser integrado con un conjunto de elementos de seguridad y un PLC, que doten al sistema con las funcionalidades necesarias para poder realizar prácticas docentes con la celda, y a la vez, proporcionar mecanismos para hacer más seguro el uso del sistema. El diseño, deberá cumplir en todo momento con las diferentes normativas de seguridad aplicadas a la integración de los sistemas robóticos en celdas robotizadas. A continuación, se muestra una pequeña lista donde se sintetizan todos los objetivos del presente trabajo:

- Diseñar un sistema que permita la interconexión del robot con otros elementos externos.
- Estudiar las diferentes normativas ISO referentes a robótica y a celdas robotizadas.
- Diseñar una celda robotizada que integre el robot Mitsubishi RV-2AJ y sus elementos adjuntos.
- Realizar un diseño seguro con los elementos de seguridad adecuados según las normativas.

- Diseñar todo el conexionado eléctrico del sistema y establecer la programación del PLC.
- Comprobar el funcionamiento del sistema mediante simulaciones 3D.

### **1.3. Alcance del trabajo**

El alcance de este trabajo es presentar un diseño completo de la celda ya mencionada, especificando todos los requisitos técnicos y de montaje de los elementos que la conformaran. Asimismo, también se especificará todo el conexionado entre los elementos del sistema y el funcionamiento del mismo, llegando a describir como se comportaría en cada situación. Por otro lado, se hará un estudio exhaustivo de las normativas, que se traducirá en la explicación de toda normativa que se aplique en el diseño. El trabajo también llegará a dar un modelo 3D de la celda diseñada, que permitirá visualizar el montaje de los elementos de seguridad con todo detalle.

Para lograr el diseño de la celda, también se especificarán todas las características técnicas del robot Mitsubishi RV-2AJ y se hará un estudio sobre las funcionalidades de seguridad que incorpora. Atendiendo también a sus posibilidades de conexión con el entorno, identificando sus interfaces y especificaciones.



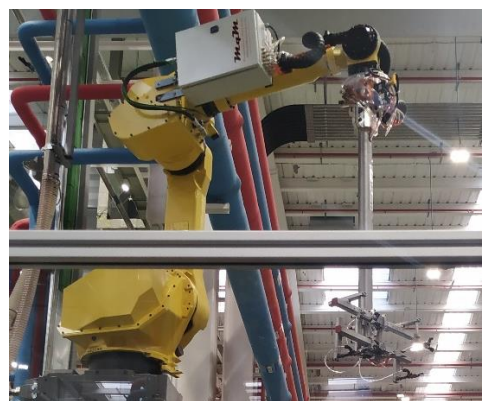
## 2. Robots industriales y celdas robotizadas

En este capítulo, se hace una pequeña introducción al mundo de los robots y a su integración dentro de sistemas automáticos. En él, se describe la diferencia entre un robot industrial y un manipulador, y se comentan los aspectos claves de las estaciones o celdas robotizadas.

### 2.1. ¿Qué es un robot industrial?

Según la AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación) y de acuerdo con la ISO (Organización Internacional de Estandarización) un robot industrial es un “manipulador controlado automáticamente, reprogramable y multifuncional, programable en tres o más ejes, que puede ser fijo o móvil y que se utiliza en aplicaciones industriales automatizadas”. Esta definición extraída de la norma UNE-ISO 10218-1:2012, dice también que el robot industrial se compone por el manipulador, sus actuadores y el sistema de control. Pero, ¿qué es un manipulador? Según la norma UNE-ISO 8373:1998, éste es una máquina cuyo mecanismo está generalmente compuesto por una serie de segmentos articulados o deslizantes unos en relación con los otros, que tiene como finalidad coger o desplazar objetos (piezas o herramientas) generalmente según varios grados de libertad.

De estas definiciones se puede extraer que el manipulador es una máquina más sencilla con unas trayectorias predefinidas dadas por los movimientos de sus ejes, normalmente actuados por cilindros neumáticos y que tiene como limitación del movimiento topes mecánicos. Mientras que el robot industrial ofrece mucho más potencial, siendo posible el control absoluto de sus movimientos y ofreciendo trayectorias variables y programables dadas por la actuación eléctrica de sus ejes.



**Figura 2.1.** Imágenes de un manipulador (izquierda) y de un robot industrial (derecha)

Con lo cual, aplicando las definiciones y funcionalidades de cada uno en el ámbito industrial, se puede intuir que el manipulador se utilizará para aplicaciones más sencillas donde solo haga falta mover

pequeñas cargas y sin mucha precisión. Y el robot, se empleará en aplicaciones de alta precisión y que requieran movimientos de cargas más pesadas. Además de todo ello, cabe apuntar que el coste del manipulador es menor que el del robot.

Ambos se pueden integrar en sistemas automatizados, y la elección de uno u otro, debe estar de acuerdo con los aspectos citados anteriormente para así optimizar el coste de la automatización. Normalmente, y salvo excepciones, los manipuladores se suelen integrar en estaciones de trabajo automatizadas, máquinas transfer<sup>1</sup> o sistemas de fabricación flexibles (FMS)<sup>2</sup>. Y los robots, en celdas robotizadas.



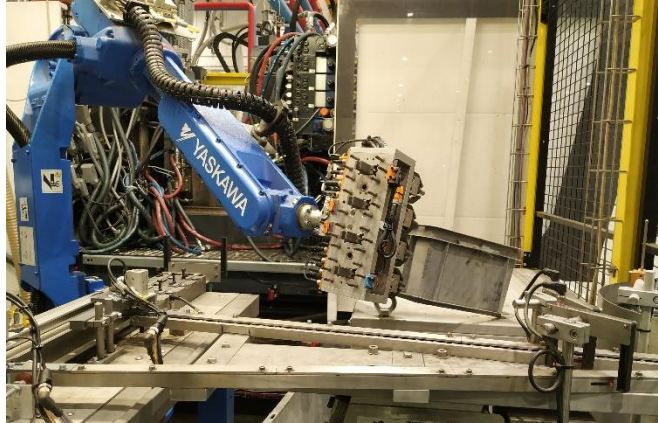
**Figura 2.2.** Sistema de fabricación flexible ubicado en el laboratorio A5.4.

## 2.2. Integración de robots. Celdas Robotizadas.

Según la norma UNE-ISO 10218-2:2011, una celda robotizada es aquella que se compone de uno o más sistemas robóticos incluyendo la maquinaria correspondiente, el espacio de seguridad y las medidas de protección correspondientes. También concreta que un sistema robótico, es el que comprende el robot industrial, los elementos terminales y los equipamientos auxiliares que ayudan al robot a realizar su tarea. De alguna manera, se puede describir la celda robotizada como aquella área restringida donde trabaja el robot y quedan recogidos todos los elementos necesarios para que trabaje.

<sup>1</sup> **Máquina transfer:** máquina constituida por varias estaciones, donde se realizan múltiples tareas sobre una misma pieza de manera secuencial y con un volumen muy alto de producción.

<sup>2</sup> **Sistema de fabricación flexible (FMS):** sistema con un conjunto de estaciones de trabajo intercomunicadas por un sistema de transporte de piezas automatizado. Se diferencian de las máquinas transfer por su flexibilidad a la hora de fabricar cualquier tipo de piezas y porque normalmente, son modulares y no fijas como las transfer.



**Figura 2.3.** Celda robotizada para inyección de piezas de plástico con tuercas

A diferencia de las estaciones de trabajo automatizadas o las máquinas transfer, donde se fabrica un solo tipo de pieza, las celdas robotizadas se pueden adaptar a cualquier tipo de tarea y pieza según la necesidad. Por ejemplo, si se utiliza una celda robotizada para extraer una pieza mecanizada de una máquina de control numérico y depositarla en una cinta, si se adapta bien el elemento terminal del robot, se podrá mecanizar cualquier tipo de pieza. Cosa que con una máquina transfer no se podría hacer, ya que siempre debería ser la misma pieza. Esto extrapolado a la aplicación presentada en la *figura 2.3.*, querría decir que con esa misma celda se podría fabricar cualquier tipo de pieza, siempre y cuando se adaptara el elemento terminal.

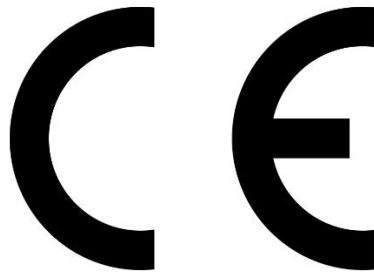
Tal y como indica la definición dada en la norma, la celda incluye el espacio de seguridad y elementos de protección. Éste aspecto es muy importante, ya que dentro de la celda el robot ejecuta movimientos a alta velocidad, con lo cual cualquier contacto con una persona podría resultar fatal (aplastamiento, golpes, proyección a alta velocidad, etc.). Por lo tanto, el límite físico de la celda robotizada se corresponde con el espacio de seguridad del robot.

En los últimos años, la implementación de robots en el ámbito industrial ha crecido exponencialmente, dada su versatilidad, rapidez y precisión. También, su capacidad para realizar tareas peligrosas y trabajos que manualmente se considerarían muy físicos, lo hacen el componente ideal para trabajar en una industria. Todo ello, requiere que cada vez más los trabajadores de las industrias estén en contacto con ellos, por eso es sumamente vital extremar las precauciones en cuanto a seguridades respecta.

### 3. Normativas referentes a robótica

Aunque durante todo el trabajo se irá explicando la aplicación de las diferentes normativas a la celda robotizada diseñada, en este capítulo se presentan todas las normativas ISO existentes en relación a la robótica a nivel industrial. La correcta aplicación de éstas es muy importante, ya que aseguran que los robots o celdas robotizadas diseñadas cumplen con todos los estándares de seguridad.

En la Unión Europea, todas las máquinas comercializadas y puestas en servicio deben cumplir con la directiva Europea sobre máquinas 2006/46/CE, aprobada por el parlamento Europeo en 2006, y que se recoge en la legislación nacional mediante el Real Decreto 1644/2008. Ésta, asegura que las máquinas cumplen con unos requisitos técnicos y legales mínimos, y normalmente viene acompañada con el certificado o marcado europeo (*figura 3.1.*), marca necesaria para poder comercializar y usar la máquina dentro de la Comunidad Europea.



**Figura 3.1.** Marca del certificado o marcado europeo (Fuente [18])

La aplicación de las normativas correspondientes a los dispositivos robóticos industriales, asegura el cumplimiento de la directiva comentada anteriormente, y por lo tanto, hace que estos dispositivos puedan ser usados y comercializados dentro de la Unión Europea. Las principales normativas referentes a robótica son: la UNE-ISO 10218-1:2012, la UNE-ISO 10218-2:2011 y la ISO/TS 15066:2016. Y las tres han sido redactadas por el comité técnico internacional ISO/TC 299, dedicado a la robótica.

#### 3.1. UNE-ISO 10218. Robots y celdas robóticas

Esta primera norma, titulada: “Robots y dispositivos robóticos. Requisitos de seguridad para robots industriales”, trata de dar respuesta a los riesgos que presentan los robots y los sistemas robóticos industriales, dando así unas directrices y criterios a seguir, para así minimizar al máximo los peligros que puede suponer la aplicación de uno de estos sistemas en un entorno industrial.

El número y tipo de riesgos producidos por estos sistemas están relacionados con el proceso de automatización (tipo de robot y función) y con la manera en que está instalado, programado, operado

y mantenido. Haciendo así, que para cada sistema robótico existan diferentes riesgos a tener en cuenta. Es por todo ello, que esta primera norma se divide en dos partes, las cuales se verán a continuación.

### **3.1.1. UNE-ISO 10218-1:2012**

En esta primera parte de la norma, se especifican los requisitos e indicaciones a seguir para garantizar la seguridad en el diseño y construcción del robot. También, se describen los riesgos asociados a los robots y se dan las pautas, medidas de protección e información de uso, para eliminar o reducir dichos riesgos. Esta norma está destinada a los fabricantes de robots, a los cuales proporciona una herramienta muy útil para evaluar todos los peligros que podría suponer el robot que están diseñando.

### **3.1.2. UNE-ISO 10218-2:2011**

La segunda parte de la norma, trata los peligros derivados del diseño e integración de los sistemas robóticos industriales en celdas industriales robotizadas y líneas de producción. Igual que en la primera parte, también se proporcionan directrices, pero en este caso enfocadas a garantizar la seguridad del personal hacia todo lo que tiene que ver con la integración del robot. Comprendido por la instalación, los ensayos, la programación, el funcionamiento, el mantenimiento y la reparación de la correspondiente integración o sistema robótico.

Mientras la primera parte estaba más enfocada a los fabricantes de robots, ésta segunda, afecta a todos los “participantes” en la integración de un sistema de éste tipo. En la misma norma, se especifican como “participantes”: el fabricante, el suministrador, el integrador y el usuario final. Por último, cabe destacar que en esta norma no se especifican los peligros relacionados con los procesos de fabricación que se lleven a cabo en la celda, ya sean, humo de soldadura, radiación de láser, etc.

## **3.2. ISO/TS 15066:2016. Robots colaborativos**

Durante los últimos años, la implementación de robots colaborativos<sup>1</sup> en la industria ha sufrido un crecimiento exponencial, esto es debido a su capacidad para interactuar con el ser humano dentro del mismo espacio de trabajo, combinando así las capacidades de un humano (tacto, sensibilidad, vista) con las de un robot (levantamiento de cargas, trabajos repetitivos, alta precisión). Esta interacción

---

<sup>1</sup> **Robots colaborativos:** (según UNE-ISO 10218-2:2011) Robot diseñado para interactuar con un humano dentro de un espacio de trabajo cooperativo, compuesto por un espacio de seguridad donde robot y humano realizan tareas de forma simultánea.

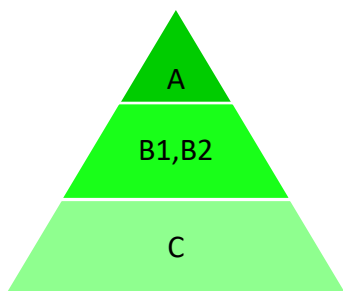
directa, y casi de “contacto”, entre el robot y el ser humano, ha derivado en unos peligros y riesgos que no se habían contemplado hasta ahora en ninguna otra norma. Es por ello, y en vista de la tendencia de la industria hacia los robots colaborativos, que la ISO se vio con la necesidad de publicar una nueva norma exclusiva para éstos. Dicha norma, publicada en febrero de 2016, se titula ISO/TS 15066:2016. Robots and robotic devices - Collaborative robots, y de distinta forma que la UNE-ISO 10218, aún no está adaptada y transcrita al español. Es por ello, que todavía no está recogida en la AENOR con el formato UNE-ISO.

Otro aspecto a destacar, es la señalización de la norma como una especificación técnica (ISO/TS) y no como un estándar (ISO), tal y como pasa con la norma UNE-ISO 10218. Esto se debe a que la ISO señala la operación colaborativa como un campo en desarrollo, y por lo tanto cree que en un futuro cercano habrá nuevos aspectos a incorporar en la norma.

Referente al contenido de la norma, ésta especifica los requisitos de seguridad necesarios para los sistemas industriales donde se integra un robot colaborativo, compuestos por un mismo espacio de trabajo donde interaccionan los robots con los humanos. También se indican los factores a tener en cuenta a la hora de diseñar y evaluar los riesgos que implican este tipo de sistemas, así como unas pautas sobre la operativa segura de éstos. Uno de los puntos a destacar, y que no se encuentra en el resto de normas dedicadas al ámbito de la robótica, es el estudio sobre los daños producidos por la colisión del robot con el cuerpo de una persona. En él, se indica la presión y la fuerza aplicada por el robot en diferentes partes del cuerpo humano, dependiendo de su velocidad máxima y de la carga que portan. Asimismo, se extrapolan unos valores de dolor y lesión asociados a estos impactos.

### 3.3. Tipos de norma e interrelación

Con tal de normalizar los requisitos de seguridad de todas las máquinas y procesos, las normas ISO se clasifican en tres tipos dependiendo de si hacen referencia a requisitos básicos y generales de seguridad, o a requisitos más específicos de un tipo de máquinas. Esto hace que se establezca una jerarquía entre los tres tipos, y es que las normativas que tratan aspectos generales se ven reflejadas o adaptadas en las más específicas.



**Normas de tipo A:** tratan requisitos básicos de seguridad y principios generales para todas las máquinas.

**Normas de tipo B:** tratan aspectos de seguridad (B1) y dispositivos de protección (B2) aplicables a todas las máquinas.

**Normas de tipo C:** tratan requisitos de seguridad específicos para una determinada tipología de máquinas.

**Figura 3.2.** Jerarquía de normas

Relacionando las tipologías con las normas vistas hasta ahora (UNE-ISO 10218 e ISO/TS 15066), se puede determinar que son de tipo C, ya que tratan los aspectos y requisitos específicos de los robots y de sus sistemas. Según la jerarquía, la aplicación de una norma de este tipo, conllevará el cumplimiento de los aspectos tratados en las normas de tipo A y B (normas básicas). Esta cuestión, se podrá ver a lo largo del trabajo, puesto que la norma UNE-ISO 10218 constantemente se va refiriendo a otras normas de tipo B, para determinar aspectos más generales y que se podrían encontrar en cualquier otro tipo de máquina. A su vez, las normativas de tipo B ya tienen en cuenta todos los aspectos de las de tipo A. Todo ello, permite que al diseñar una máquina de una determinada tipología solo se tenga que seguir como guía una norma de tipo C, y no se tenga que ir buscando entre todas las normas de tipo A y B los requisitos aplicables al tipo de máquina que se esté diseñando.

Algunos de los ejemplos de normativas básicas que se aplican a los sistemas robóticos, y que se podrán ver reflejados en el diseño de la celda robotizada, son:

Normas básicas (tipo A y B) referenciadas en la norma UNE-ISO 10218 (tipo C)		
Tipo	Norma	Título
A	UNE-ISO 12100	Seguridad de las máquinas Principios generales para el diseño. Evaluación de riesgo y reducción del riesgo.
B1	UNE-ISO 13849	Seguridad de las máquinas. Partes de los sistemas de mando relativas a seguridad.
B1	UNE-ISO 13855	Seguridad de las máquinas. Posicionamiento de los protectores con respecto a la velocidad de aproximación de partes del cuerpo humano.
B2	UNE-ISO 14120	Seguridad de las máquinas. Resguardos. Requisitos generales para el diseño y construcción de resguardos fijos y móviles.

**Tabla 3.1.** Normativas de tipo A y B aplicadas a los sistemas robóticos (Fuentes [1] [12] [14] [15])



## 4. Sistema robótico del laboratorio

El elemento principal de una celda robotizada, y por el cual se diseñan todas las medidas de seguridad correspondientes, es el sistema robótico. En su vertiente más sencilla, éste se compone por el robot y su controlador, aunque normalmente también incluye elementos externos que ayudan al robot en su operación. En el laboratorio A5.4 de la escuela, todo esto se ejemplifica en un robot Mitsubishi RV-2AJ, su controlador CR1-571 y una cinta con sensores. Estos elementos y sus especificaciones técnicas se explican a lo largo de este capítulo, para así obtener una idea exacta de lo que es el sistema robótico de la celda a diseñar.

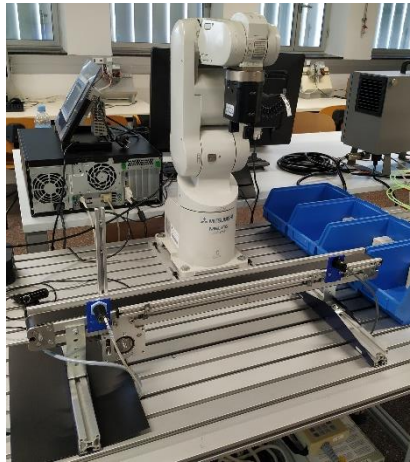


Figura 4.1. Sistema robótico del laboratorio A5.4.

### 4.1. Robot Mitsubishi RV-2AJ

El robot Mitsubishi RV-2AJ pertenece a la serie RV-A de los robots industriales MELFA de Mitsubishi. Ésta se caracteriza por ofrecer robots articulados<sup>1</sup> veloces y muy precisos, que gracias a sus reducidas dimensiones y a su gran movilidad, permiten la realización de trabajos en espacios reducidos. Los modelos más pequeños de la serie, como es el caso, son ampliamente utilizados en entornos educativos y de investigación.

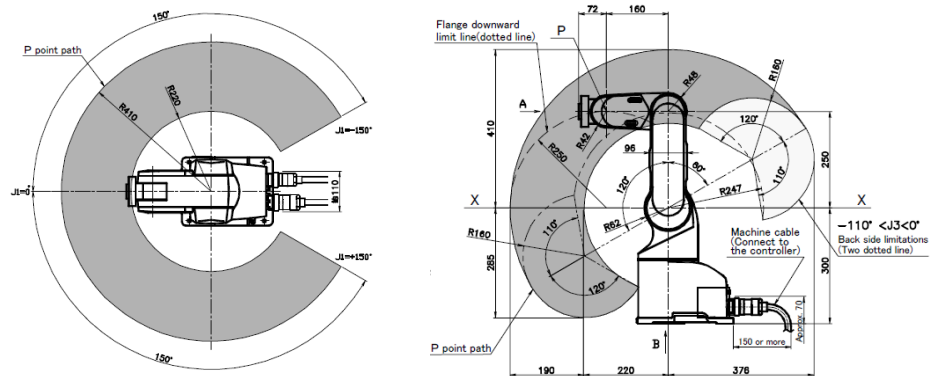
El modelo RV-2AJ se caracteriza por ser un robot con 5 ejes o grados de libertad, los cuales se refieren al número de actuadores que tiene el brazo, y que a la vez determinan la capacidad de movimiento en

---

<sup>1</sup> **Robots articulados:** tipo de robots que por su configuración mecánica tienen alguna articulación rotatoria. Normalmente se constituyen por una articulación rotacional y dos o más angulares.



el espacio tridimensional. En el caso del RV-2AJ se traduce en la capacidad de mover el extremo del robot hacia delante/atrás (eje X), arriba/abajo (eje Z), izquierda/derecha (eje Y); combinado con la rotación sobre los ejes Y y Z. Todo ello determina el alcance y espacio de trabajo<sup>1</sup> del robot, que en este caso es de 410 mm sin el elemento terminal y el área mostrada en la *figura 4.2.*, respectivamente.



**Figura 4.2.** Espacio máximo de trabajo del brazo del robot RV-2AJ (Fuente [1-1])

Otras de las características importantes de un robot, son la repetibilidad<sup>2</sup> y la velocidad máxima de operación. Éstas indican la precisión y velocidad máxima de trabajo del robot, y para el modelo RV-2AJ son igual a  $\pm 0,02$  mm y 2100 mm/s. Teniendo en cuenta que los valores típicos de precisión van de 0,01 a 0,5 mm, se puede determinar que el robot es de los más precisos del mercado, hecho que coincide con una de las bases de la serie RV-A. Referente a la velocidad, y comparado con otros modelos de la misma serie que más o menos tienen las mismas características en cuanto a dimensiones se refiere, se puede decir que el robot RV-2AJ está entre los más lentos. Como ejemplo demostrativo de ello, se puede comparar con el modelo RV-5AJ, que ofrece una velocidad máxima igual a 5800 mm/s con una repetibilidad de  $\pm 0,03$  mm.

Una de las características más importantes a tener en cuenta a la hora de comprar o escoger un robot, es la capacidad de carga que tiene. Esta indica el peso máximo que puede transportar o llevar el robot en su extremo sin dañar la estructura mecánica y/o los actuadores del brazo robótico. En el mercado actual se pueden encontrar capacidades de carga desde 0,5 kg hasta 2300 kg, siempre condicionado a la estructura del robot y actuadores que tenga. En referencia al robot RV-2AJ, su capacidad de carga máxima es de 2 kg, aunque el fabricante indica una capacidad de carga nominal de 1,5 kg. Como se ha

<sup>1</sup> **Espacio de trabajo:** (según UNE-ISO 10218-1:2012) espacio que puede ser alcanzado por los componentes móviles del robot y/o por el elemento terminal del robot.

<sup>2</sup> **Repetibilidad:** radio máximo del conjunto de puntos alcanzados para una misma posición ordenada.

dicho, y como se puede ver en la *figura 4.1.*, estos valores concuerdan con las pequeñas dimensiones del robot. Por otra parte, el accionamiento del robot se hace mediante 5 servomotores AC, uno por cada articulación del robot, y tienen unas potencias de 50 W (ejes 1,2 y 3) y 15 W (ejes 4 y 6). A continuación, y a modo de resumen, se adjunta una tabla con las características principales del robot.

Especificaciones técnicas del robot RV-2AJ		
Grados de libertad		5
Sistema de accionamiento		Servomotores AC (J1, J2, J3: 50 W con freno; J4, J6 15 W: sin freno)
Dimensiones del brazo robot	Parte superior	250 mm
	Antebrazo	160 mm
	Muñeca	72 mm
Rango de operación de los ejes	Eje J1	300° (-150° a 150°)
	Eje J2	180° (-60° a 120°)
	Eje J3	230° (-110° a 120°)
	Eje J5	180° (-90° a 90°)
	Eje J6	400° (-200° a 200°)
Velocidad máxima de trabajo		2100 mm/s
Capacidad de carga	Máxima	2 kg
	Nominal	1,5 kg
Repetibilidad		±0,02 mm
Peso del robot		17 kg
Alcance del robot		410 mm

**Tabla 4.1.** Características principales del robot RV-2AJ de Mitsubishi y su brazo (Fuente [1-1])

## 4.2. Controlador Mitsubishi CR1-571

Cualquier sistema robótico, por pequeño que sea, necesita de un controlador que gobierne y controle el brazo o la estructura mecánica del robot. Para ello, el controlador establece los movimientos de cada actuador y les manda las señales de control correspondientes. El movimiento conjunto de todos los actuadores permite que el terminal del robot pueda ser llevado a la posición y orientación requeridas. Todos estos movimientos se generan de acuerdo a los programas del robot y a un modelo físico del mismo, ambos ejecutados y almacenados en el controlador. Además del control de movimientos, éste también permite la comunicación con el entorno exterior del robot, ya sea con el usuario, para permitir programar el robot, o con elementos externos como sensores, actuadores, PLC, etcétera.

Respecto al controlador Mitsubishi CR1-571, es compatible con diferentes modelos de robots de la serie RV-A y de la RP-AH, y puede controlar simultáneamente un máximo de 6 ejes. Contiene un microprocesador multitarea de 64 bits capaz de ejecutar 32 programas paralelamente, y tiene una capacidad de memoria suficiente para guardar 88 programas de 5000 líneas cada uno. Otro de los aspectos a destacar es que permite registrar un total de 2500 posiciones, y que la generación de

trayectorias entre estas se hace mediante interpolaciones axiales, lineales y circulares; permitiendo así el movimiento del robot eje a eje, o conforme a las coordenadas cartesianas o cilíndricas del elemento terminal. Como cualquier otro controlador tiene diferentes modos de operación, que en este caso se corresponden a: TEACH (manual), AUTO (controlador) y AUTO (externo). Con el primero, se puede mover el robot manualmente mediante la teach pendant<sup>1</sup>. Con el segundo, se opera el robot mediante el controlador. Y con el tercero, se controla la operación del robot externamente vía las comunicaciones con elementos externos como PLC u ordenadores. Para pasar de un modo a otro, solo hay que cambiar de posición el selector de llave ubicado en el panel frontal del controlador (figura 4.3).

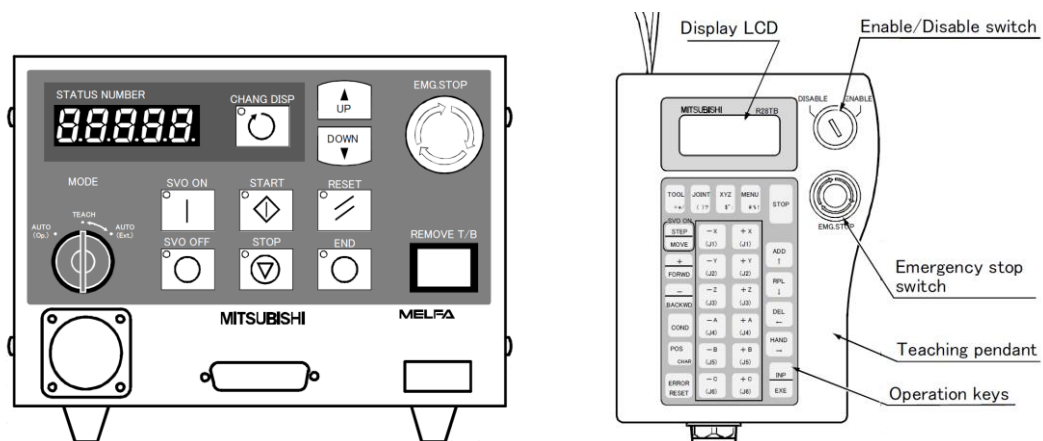


Figura 4.3. Panel frontal del controlador CR1-571 de Mitsubishi y teach pendant del robot (Fuente [1-1])

#### 4.2.1. Lenguaje de programación. MELFA-BASIC IV

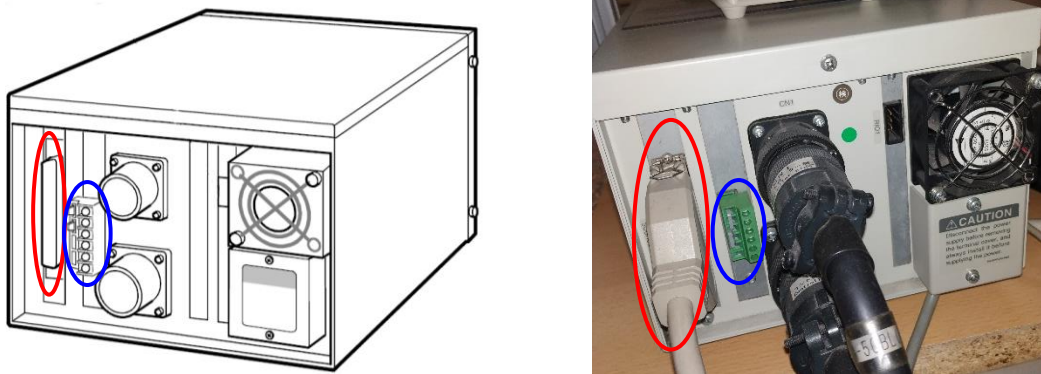
El lenguaje de programación del controlador CR1-571 es el MELFA-BASIC IV, y es por ello, que el tipo de robots que controlan se llaman robots MELFA. Este lenguaje, creado por Mitsubishi única y exclusivamente para sus robots, es una mezcla entre el lenguaje de programación BASIC y las diferentes instrucciones características del robot, como las de moverse a un punto o ajustar la velocidad de un movimiento. Tal y como indica Mitsubishi en los diferentes catálogos, se apostó por este lenguaje debido a su potencialidad y al sencillo aprendizaje del mismo, y es que se pueden crear programas complejos en poco tiempo y sin grandes complicaciones de sintaxis, como por ejemplo, una aplicación de *Pick & Place* donde se tenga que recoger una pieza de una cita y llevarla a otra. En relación a las funciones de seguridad del robot, se gestionan por el controlador independientemente del programa que se esté ejecutando. Con lo cual, la programación del robot en ningún momento tiene el control de las seguridades, sino que ya hay unos programas internos, que ejecutan los procedimientos

<sup>1</sup> **Teach pendant:** consola externa conectada al controlador del robot que permite la programación y el movimiento manual del mismo. Normalmente se utiliza para guardar las coordenadas de las posiciones.

a seguir si hay una emergencia. Más adelante, se verá que hay unas entradas específicas para la seguridad, y que cada una de ellas gestiona la alarma de manera diferente.

#### 4.2.2. Entradas y salidas (E/S) externas.

Como se ha comentado anteriormente, los controladores permiten la conexión de los robots con elementos externos. Una de las interfaces más frecuentes y más utilizadas en el mundo de los robots es la de entradas y salidas (E/S) externas. Para ello, los controladores incluyen tarjetas físicas que permiten un fácil acceso a las señales de entrada y salida del controlador. Esta interfaz tiene grandes ventajas, y es que permite que se puedan integrar en el sistema robótico pequeñas estaciones de trabajo o automatizaciones sin la necesidad de un PLC. Un ejemplo práctico podría ser el control de una cinta donde el robot depositara unos objetos, o el control de unas electroválvulas que permitiera al robot coger unas piezas mediante unas ventosas. Si se deseara controlar sistemas más grandes, entonces sí sería de obligada necesidad la implementación de un PLC, gracias a su mayor capacidad de gestión de datos.



**Figura 4.4.** Módulo de entradas y salidas externas (en rojo), y de seguridad (en azul) del controlador CR1-571  
(Fuente [1-1])

Por lo que respecta al controlador CR1-571, dispone de tres tipos de entradas y salidas externas, las cuales se corresponden a:

- **E/S dedicadas:** entradas y salidas dedicadas a la ejecución del control externo del robot y a la monitorización del mismo. Solo son activas cuando el modo de operación del controlador es AUTO (externo), y con ellas se pueden desempeñar funciones como: la puesta en marcha o parada del robot, el encendido o apagado de los servomotores, la configuración de la velocidad de operación, el movimiento manual del robot, etc. Todas estas funciones se activan mediante las entradas, y las salidas únicamente se dedican a informar del estado de las mismas.

- **E/S de propósito general:** entradas y salidas programables utilizadas para el control o lectura de estados de dispositivos externos como: sensores, motores, electroválvulas, etcétera. Están siempre en funcionamiento y son controladas por el programa del robot, en el cual se establece cuando se leen (entradas) o se activan y desactivan (salidas).
- **E/S del elemento terminal:** entradas y salidas únicamente utilizadas para el control del elemento terminal del robot. Igual que las anteriores, siempre están activas y su control se hace mediante el programa del robot. En el caso del robot del laboratorio, el elemento terminal es una pinza con accionamiento mecánico y solo se dispone de salidas para su control.

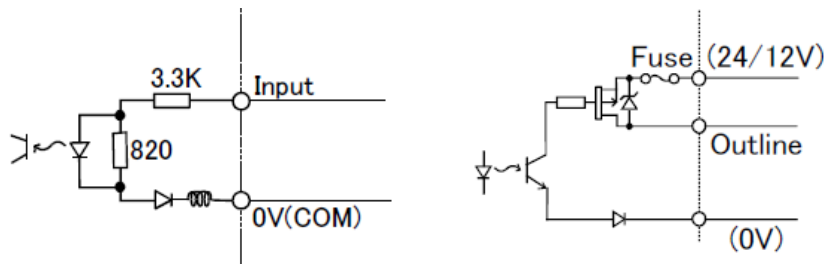
En referencia a las interfaces de los diferentes tipos de señales vistas, las salidas de control del elemento terminal tienen como interfaz un conector independiente situado en el extremo del robot, con el objetivo de simplificar al máximo el conexionado de los actuadores del terminal con el controlador. A través de este conector se proporciona cuatro señales o salidas de control dedicadas a las señales de apertura y cierre de dos posibles pinzas. Cabe destacar también, que de la misma forma que los posibles elementos terminales del robot, el cable de conexión es específico de la marca Mitsubishi, y por lo tanto, al conector no se podrán conectar otras cosas que no sean elementos terminales de la marca.

Por otro lado, los tipos de señales correspondientes a E/S dedicadas y de propósito general tienen como interfaz un conector SCSI cn100 de 50 pines hembra ubicado en la parte trasera del controlador. Este conector, acrónimo de *Small Computer System Interface*, fue desarrollado en 1978 para la conexión y transferencia de datos entre computadoras y dispositivos externos. Su diseño basado en la comunicación paralela<sup>1</sup>, permite que la comunicación entre los dispositivos conectados sea más rápida y eficaz, cuestión que es de interés a la hora de establecer una interacción entre el robot y elementos externos. Respecto a la arquitectura de éste, se compone de 16 entradas y 16 salidas externas conjuntamente con otras entradas referentes a tensiones de alimentación de las mismas. En un principio, y si no se ha configurado nada en el controlador, todas las entradas y salidas dichas son de propósito general, excepto las entradas de la 0 a la 5 y las salidas de la 0 a la 3, las cuales ya están configuradas como E/S dedicadas. En todo caso, esta configuración se puede modificar cambiando los diferentes parámetros del controlador, los cuales indican que E/S se asignan a cada función, configurándolas así como E/S dedicadas. De las 32 entradas y salidas que hay, cualquiera puede ser configurada como dedicada o de propósito general, salvo la entrada 0 que siempre será asignada como entrada dedicada para la función de parar el robot.

---

<sup>1</sup> **Comunicación paralela:** comunicación en la que todos los bits de la información a transmitir se envían a la vez, por ello, en la interfaz de estas comunicaciones hay tantos pines como bits a transmitir.

En cuanto a las entradas referentes a tensiones de alimentación, hay de dos tipos: las que sirven para introducir el voltaje común de las señales de las E/S, y las que sirven para introducir el voltaje que se obtendrá cuando se active una de las salidas. Estos voltajes o tensiones se corresponden con 0 V para el común y 24 V para la tensión de referencia de las salidas, y tienen que ver con la configuración de la tarjeta de E/S, que en este caso es de tipo *Source*. En caso de ser del otro tipo disponible, llamado *Sink*, la tensión común sería de 24 V y la de referencia de 0 V. Para acabar de entender la funcionalidad de estas entradas, a continuación se adjuntan los circuitos completos de las entradas y salidas del controlador.



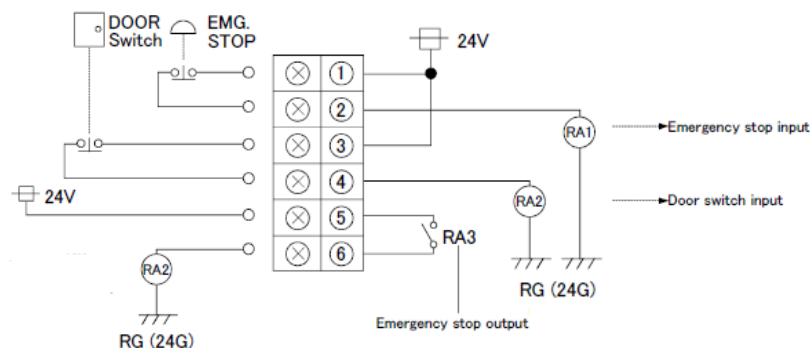
**Figura 4.5.** Circuitos internos de las entradas (izquierda) y de las salidas (derecha) (Fuente [1-1])

Como se puede observar en el circuito de las entradas, el voltaje común es de 0 V, permitiendo así que si se activa una de éstas (24 V en el terminal *Input*), circule la corriente por el circuito y se active el diodo del fototransistor. Éste último, es el que irá conectado al microprocesador del controlador y por lo tanto el que le pasará la información de si la entrada está activa o no. En el circuito de las salidas, cuando el microprocesador activa el diodo del fototransistor, éste cierra el circuito entre el transistor MOSFET y el voltaje común (0 V), haciendo que paralelamente se cierre el circuito entre la entrada de 24 V y la salida. En este caso, el MOSFET actúa como un interruptor accionado por una señal del microcontrolador, que permite conectar la entrada de tensión con la salida. Como se verá más adelante, los pines de entradas del voltaje común y de referencia sirven para un grupo de E/S, y no hay un pin por cada entrada o salida como podrían dar a entender los circuitos vistos.

#### 4.2.3. Entradas y salidas (E/S) de seguridad

Otro tipo de entradas y salidas externas de los controladores de robots son las relativas a seguridad, cuyo número y funcionalidad vienen marcados por la norma UNE-ISO 10218-1:2012. A diferencia de las tratadas en el apartado anterior, éstas ni son configurables ni son programables, ya que como marca la norma, deben establecer una serie de acciones sobre el robot cuando alguna de ellas se activa. En el caso del controlador CR1-571 se dispone de dos entradas con diferentes funcionalidades, y de una salida, que informa de la activación de alguna de las dos funciones anteriores. En relación a la interfaz que permite su conectividad, se trata de un bloque de 6 terminales (*figura 4.4. en azul*), dónde los dos

correspondientes a las entradas de activación funcionan con lógica negada<sup>1</sup>. En la siguiente figura, se muestran los circuitos internos de cada terminal y un ejemplo de conexionado; posteriormente, se hace una breve explicación con el objetivo de entender el funcionamiento del sistema.



**Figura 4.6.** Diagrama del bloque de terminales dedicado a las E/S de seguridad y conexionado externo  
(Fuente [1-1])

Tal y como se puede ver en la figura, los terminales de entradas de activación se corresponden con el 2 y el 4, mientras que la salida que proporciona la señal de información se corresponde con el 6. Una vez sabido esto, se puede establecer una semejanza entre los circuitos que van del terminal 1 al 2 y del 3 a 4. Éstos se corresponden con las conexiones de los elementos de seguridad, y como se puede observar, mandan la señal de 24 V a los terminales 2 y 4 cuando los elementos de seguridad no están activos. En este momento, no habría ninguna emergencia activada, con lo cual el contacto marcado como RA3 no estaría activado, y por lo tanto la tensión de 24 V externa introducida por el terminal 5, no estaría en el terminal 6 (salida informativa). En el caso de activarse alguno de los dos elementos de seguridad, cortaría la tensión de 24 V de los terminales 2 y 4, y provocaría que se ejecutará alguna de las dos funciones de seguridad; activando así el contacto RA3, y proporcionando una señal de 24 V en la salida informativa correspondiente con el terminal 6.

Como ya se ha dicho, y se ha podido constatar en la *figura 4.6.*, el controlador tiene dos entradas dedicadas a dos funciones de seguridad diferentes. Éstas, se corresponden con la función de parada de emergencia (*emergency stop*) y con la de interruptor de la puerta (*door switch*). La primera, relacionada con los pulsadores de emergencia, corta la tensión de alimentación de los servomotores y activa sus frenos para parar inmediatamente el robot. Por otra parte, la segunda función intenta dar una respuesta a la protección del posible vallado del robot, activándose a través de elementos que detecten si éste ha sido traspasado o no. Su función cambia respecto al modo de operación que se

<sup>1</sup> **Activación por lógica negada:** en este tipo de entradas, el nivel de activación es 0 V (considerado un 0) y el de reposo 24 V (considerado un 1). Por lo tanto, si la señal no está activa será de 24 V.

haya seleccionado, ya que en muchas ocasiones se tiene que entrar en el vallado para hacer alguna operación con el robot en teach (manual). Por ello, cuando el controlador está en teach, la función de seguridad se desactiva y permite el movimiento del robot aun traspasando su vallado. Por el contrario, si el controlador está en automático, a la que se activa algún elemento de protección del vallado, el robot se para inmediatamente como si de una parada de emergencia se tratara. Después de ver las dos funciones, se puede constatar que la que tiene un grado de emergencia mayor es la primera.

#### 4.2.4. Otras comunicaciones

Además de las entradas y salidas indicadas en los apartados anteriores, hay otras interfaces que permiten la conectividad del robot con elementos exteriores. Éstas son un poco más especiales, ya que posibilitan la comunicación con otros dispositivos cuya conectividad no sería posible con las entradas y salidas externas. Como ejemplos de éstos, se pueden ver: ordenadores, pantallas, otros controladores de robots, *drivers* de motores o simplemente módulos de extensión de E/S externas. En los controladores actuales, las interfaces más habituales que permiten estas conexiones son puertos de comunicación USB y Ethernet<sup>1</sup>.

En cuanto al controlador CR1-571 del laboratorio, al ser un modelo más antiguo solo incorpora un puerto de comunicación RS-232C<sup>2</sup>. Su uso se limita principalmente a conectar el controlador con un ordenador externo, para así poder cargar los programas del robot y controlar el mismo mediante el software de programación instalado en el ordenador (previa selección del modo de operación AUTO (externo)). Pese a ello, Mitsubishi ofrece un módulo de expansión para el controlador en el cual se pueden instalar diferentes tarjetas que permiten otras comunicaciones como Ethernet o CC-Link. El módulo y las tarjetas se venden de forma separada del sistema robot-controlador, y no vienen integradas, dejando así como única comunicación del modelo serie la del RS-232C. Cabe destacar, que en controladores actuales de la misma marca como el CR750, sí que traen ya incorporados los puertos USB y Ethernet. Todo ello se debe a la necesidad actual de las empresas, en las cuales el uso de Ethernet es muy generalizado.

---

<sup>1</sup> **Ethernet:** estándar de comunicación de redes locales para computadoras. Muy utilizado en la industria debido a su fácil implementación, alto rendimiento y flexibilidad al conectar dispositivos (tantos como se quieran).

<sup>2</sup> **RS-232C:** interfaz de comunicación serie entre un equipo terminal de datos que envía información (ordenador), y un equipo terminal de comunicación de datos que la recibe y la adecua (controlador robot).



### 4.3. Sistema de trabajo adjunto al robot

Como se ha visto en diferentes apartados de este capítulo, los robots normalmente van acompañados de pequeñas estaciones de trabajo o automatizaciones que permiten su operación. En el caso del laboratorio, el robot RV-2AJ viene acompañado por una pequeña cinta transportadora y dos sensores de presencia. Un ejemplo de su uso es la clasificación de piezas en unos cubiletes, donde la pieza se detiene al llegar al primer sensor y espera a que desde el ordenador se envíe al controlador el número de cubilete al cual irá. Una vez hecho, se pone en marcha la cinta hasta que la pieza llega al segundo sensor, donde el robot la recoge y la lleva al cubilete correspondiente. Todo este sistema se controla mediante las E/S externas del controlador del robot, el cual tiene como entradas las dos señales de los sensores y como salida el accionamiento del motor. Algunas de las características más importantes de los componentes, y que se tendrán que tener en cuenta a la hora de diseñar la celda, son:

- **Motor Nidec serie 404 603:** motor alimentado a 24 V con consumo de 2 A en régimen nominal. Su conexionado se hace a través de dos terminales, en los cuales se conecta el positivo (24 V) y negativo (0 V) de la alimentación. La disposición de éstos solo depende del sentido en el que se quiera hacer girar el motor, ya que éste es bidireccional y no tiene una polaridad fija.
- **Sensores Omron E3FZ-D82:** sensores fotoeléctricos de presencia de pieza, alimentados en un rango de 10 a 30 V con consumo de 25 mA. Cuando el sensor detecta, en la salida ofrecen una tensión y corriente máximas correspondientes a 30 V y 100 mA. El conexionado se realiza a través de un cable de 3 hilos, en el cual el cable marrón corresponde con la alimentación positiva, el azul con la alimentación negativa y el negro con la señal de salida del sensor. Ésta última, está configurada como salida PNP, lo cual indica que el voltaje común es 0 V y que la salida dará una tensión positiva como p. ej. 24 V. Esto hace que estos sensores sean compatibles con las E/S externas del robot, ya que eran de tipo *Source* y el común también lo tenían en 0 V.



Figura 4.7. Cinta transportadora y sensores del sistema de trabajo adjunto al robot

## 5. Diseño de la interfaz de conexión con las E/S del robot

Uno de los primeros problemas encontrados a la hora de diseñar la celda del robot, es la conexión de los diferentes elementos que no son de seguridad con las E/S externas del controlador del robot. Como se explicó en el apartado 4.2.2, la conexión de éstas está integrada en un conector SCSI cn100 de 50 pines hembra, lo que supone no tener disponible ningún borne o algún elemento físico lo suficientemente grande como para poder conectar directamente los cables de los sensores o del motor. Por ello, se ha optado por el diseño de una pequeña placa de circuito impreso (PCB) con un bloque de terminales fijos que permita estas conexiones. Todo su diseño, justificación y la elección de componentes para la placa, se comentan a continuación.

### 5.1. Requisitos de la interfaz

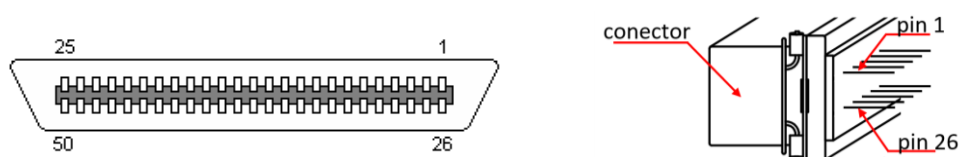
Teniendo en cuenta la problemática expuesta, la idea inicial de la placa es poder crear una interfaz para las E/S externas similar a la de las E/S de seguridad. Esto supone la instalación de algún tipo de terminal en la placa que permita el conexionado individual y directo de cada E/S externa del controlador; cuestión que con el conector es totalmente imposible. Por lo tanto, y considerando que hay un total de 16 entradas y 16 salidas externas disponibles, y que los elementos a conectar al robot ocuparán un total de 2 entradas, para los dos sensores, y 1 salida, para el accionamiento del motor. Se establece como primera premisa, que la placa deberá permitir el conexionado de 5 entradas y de 3 salidas en total. Este número viene justificado por el hecho de permitir algunas conexiones más de las necesarias, por si en un futuro se decidiera conectar otros elementos. Además, permite establecer un buen compromiso entre dificultad del diseño de la placa y funcionalidad.

Otra cuestión a tener en cuenta, es el conexionado de las señales de alimentación de las E/S, que como ya se comentó en el apartado 4.2.2, también se conectan a través del conector. Para éstas, y con tal de minimizar los terminales de la placa, se estipula que habrá solo dos conexiones, una para los 24 V de la tensión de referencia y otra para los 0 V de la tensión común.

Todo ello, deberá estar conectado a través de la PCB a un conector SCSI cn100 de 50 pines hembra, que a la vez y mediante un cable SCSI macho de 5m proporcionado por el fabricante, estará conectado al conector hembra del controlador del robot. Este sistema tendrá que dar una solución al problema inicialmente planteado, y permitirá la conexión directa de elementos externos al robot como los sensores y/o el accionamiento del motor. Al ser simplemente una interfaz, los componentes que compondrán la PCB deberán seguir las especificaciones eléctricas de las E/S del robot, ya que actuará como una extensión del conector de éstas.

## 5.2. Pin layout del conector SCSI

Uno de los primeros pasos a la hora de diseñar la nueva interfaz, es determinar que pines del conector corresponden a cada señal o a cada entrada y salida externa del robot, de modo que se pueda saber dónde irán las conexiones provenientes de cada terminal. Toda esta información, queda recogida en el *pin layout* (patillaje) del conector y en la lista *pin no. and signal assignment* del manual de especificaciones del robot. Esta última, viene establecida libremente por el fabricante del robot, mientras que el patillaje, viene marcado por el estándar internacional ISO 14776-155:2010 tal y como se muestra a continuación.



**Figura 5.1.** *Pin layout* de un conector SCSI hembra de 50 pines (Fuente [3])

Como ya se ha dicho, uno de los requisitos del diseño es que la placa debe disponer de un conector SCSI cn100 de 50 pines hembra. Esto supone, que el patillaje a tener en cuenta a la hora de diseñarla será el correspondiente al mostrado en la *figura 5.1*. Una vez sabido esto, el siguiente paso a hacer es mirar en la lista de asignación que señal corresponde a cada pin, para así saber que se deberá conectar en cada uno de ellos. Por ello, a continuación se adjunta la lista que relaciona el número de pin con la señal correspondiente.

Interface CN100pin no. and assignment list <Source type>							
Pin	Function	Pin	Function	Pin	Function	Pin	Function
1	Ground	14	0V (15-22)	26	Ground	39	0V (40-47)
2	0V (4-7;10-13)	15	Input 0	27	0V (29-32;35-38)	40	Input 8
3	24V (4-7;10-13)	16	Input 1	28	24V (29-32;35-38)	41	Input 9
4	Output 0	17	Input 2	29	Output 4	42	Input 10
5	Output 1	18	Input 3	30	Output 5	43	Input 11
6	Output 2	19	Input 4	31	Output 6	44	Input 12
7	Output 3	20	Input 5	32	Output 7	45	Input 13
8	Reserved	21	Input 6	33	Reserved	46	Input 14
9	Reserved	22	Input 7	34	Reserved	47	Input 15
10	Output 8	23	Reserved	35	Output 12	48	Reserved
11	Output 9	24	Reserved	36	Output 13	49	Reserved
12	Output 10	25	Reserved	37	Output 14	50	Reserved
13	Output 11			38	Output 15		

**Tabla 5.1.** Asignación de señales a cada uno de los pines del conector SCSI cn100 del controlador (Fuente [1-1])

Para facilitar la comprensión de la tabla anterior, se han coloreado los pines relacionados con las señales de interés de la nueva interfaz a diseñar. Por ello, se marcan en amarillo las señales relacionadas con la alimentación de las E/S, en verde las entradas (*Inputs*) y en rojo las salidas (*Outputs*). Por último, indicar que al lado de las tensiones de alimentación se muestra para que grupo de pines son válidas, y que las señales de *ground* se refieren a la puesta a tierra. Como se verá, éstas no se utilizan ni conectan debido a la baja tensión y corriente que circula por la interfaz.

### 5.2.1. Especificaciones eléctricas del conector

Uno de los aspectos principales de esta nueva interfaz de conexión, es que es una adaptación del conector SCSI a otro tipo de conector donde la conexión directa de elementos es más fácil. Lo cual quiere decir, que es una prolongación de los circuitos de conexión de E/S externas hacía más allá de lo que sería el controlador y el conector SCSI. Esto significa, que el usuario del sistema mirará las especificaciones eléctricas de las E/S del controlador para decidir si los elementos que quiere conectar cumplen o no con ellas; y no las de la nueva interfaz. Por lo tanto, hay que asegurar que la interfaz diseñada cumpla con las características de tensión y corriente máximas para las que están diseñadas los circuitos internos del conector. En otras palabras, las especificaciones eléctricas que deberán cumplir el diseño y los componentes seleccionados para la placa, tendrán que ser como mínimo las mismas que las de los circuitos internos de las E/S externas. Permitiendo así, que la limitación de tensión e intensidad venga marcada por el controlador y no por la interfaz. En caso de escoger características máximas menores, se podrían dañar los elementos de la placa.

Visto esto, las especificaciones eléctricas a tener en cuenta de los circuitos de las entradas y salidas del controlador, son:

Entradas (Inputs)		Salidas (Outputs)	
Tensión nominal	12 Vdc o 24 Vdc	Tensión nominal	12 Vdc o 24 Vdc
Rango de tensión	10,2 Vdc ~ 26,4 Vdc	Rango de tensión	10,2 Vdc ~ 30 Vdc
Corriente máxima	7 mA	Corriente máxima	100 mA
		Tensión alimentación	12 Vdc o 24 Vdc
		Corriente alimentación	60 mA

**Tabla 5.2.** Especificaciones eléctricas de las E/S del controlador y de sus señales de alimentación (Fuente [1-1])

Como se puede ver, se han vuelto a marcar las características con los mismos colores de la *tabla 5.1*. En este caso, el código de colores es el mismo, aunque los términos se refieren a las especificaciones de las respectivas señales, siendo por ejemplo para el rojo, características de las señales de salida del controlador.

### 5.3. Diseño eléctrico de la interfaz

Después de haber determinado el *pin layout* del conector y sus especificaciones eléctricas, se puede pasar a realizar el diseño eléctrico de la interfaz. En esta fase, se diseña el esquema eléctrico y las conexiones que tendrá que haber en la placa de circuito impreso, y se seleccionan los componentes que la conformarán. Todo ello, servirá como punto de partida para determinar la disposición de los componentes en la placa y para hacer el diseño del circuito impreso que irá en ella.

#### 5.3.1. Esquema eléctrico de las conexiones de la placa

Para realizar el diseño del esquema eléctrico de la placa, primeramente se ha de determinar el número de componentes que lo formarán y la función que deberán cumplir en el mismo. Ambas cuestiones quedan recogidas en los requisitos de la interfaz, y se concretan en un conector SCSI de 50 pines que permite la conectividad con el controlador del robot, y en un total de 10 terminales que permiten la conexión directa de las 5 entradas, las 3 salidas y las dos conexiones de alimentación. Una vez determinado esto, se ha de mirar el *pin layout* del conector para así decidir a qué pin, y por lo tanto a qué entrada o salida del robot, irá conectado cada terminal. Como ya se explicó, hay un total de 16 entradas y 16 salidas, lo cual da muchas posibilidades a la hora de decidir que entradas o que salidas conectar. A continuación, se muestra el resultado del esquema eléctrico diseñado y se justifica todo su diseño.

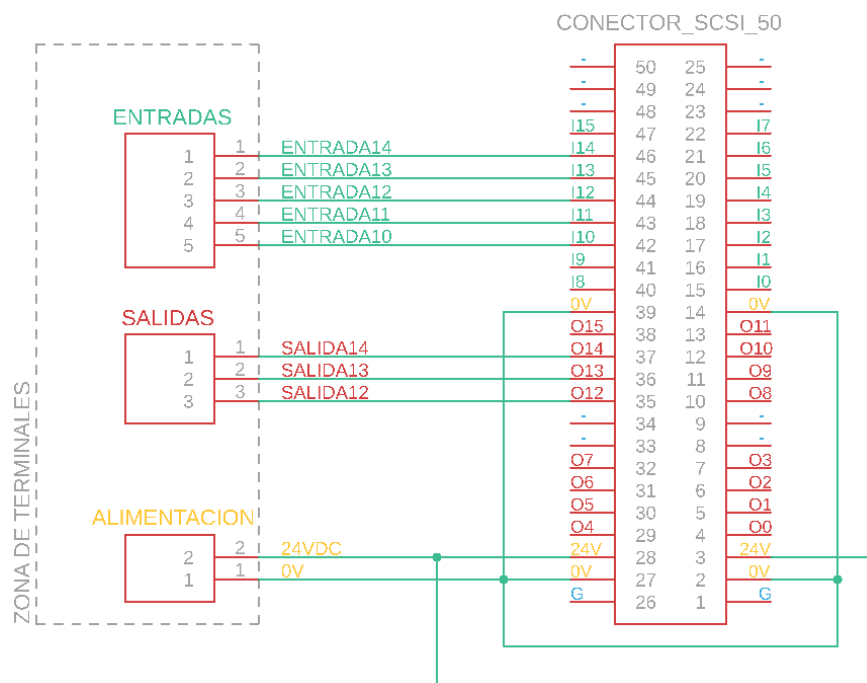


Figura 5.2. Diseño del esquema eléctrico de la interfaz realizado con el software Eagle

Una de las primeras cosas a comentar, es que se ha querido separar el esquema en tres zonas diferentes. Una conformada por los terminales de conexión, otra por el conector SCSI y sus respectivos pines, y una última con las conexiones entre los terminales y el conector. Esto se ha hecho así con el objetivo de obtener una idea inicial de cómo disponer los componentes en la placa, ya que la intención, es que ésta se divida en las tres mismas zonas. Asimismo, será de gran ayuda a la hora de diseñar el circuito impreso, ya que al haber basado el esquema eléctrico en la idea inicial de la placa, el circuito a diseñar no diferirá mucho del esquema eléctrico presentado.

Referente a la elección de los pines de las entradas y salidas a los cuales van conectados los terminales, se ha hecho teniendo en cuenta que las E/S correspondientes a los pines del 26 al 50 (lado izquierdo del conector), no están configuradas por defecto como E/S dedicadas. Como se vio en el apartado 4.2.2., el controlador está configurado por defecto para que las entradas de la 0 a la 5 (pines 15~20), y las salidas de la 0 a la 3 (pines 4~7), sean dedicadas. Esto quiere decir, que si se conectaran los terminales a esos pines y el usuario no se acordara de modificar la configuración por defecto, se podrían activar algunas de las funciones dedicadas sin que el usuario lo quisiera. Por ello, realizando las conexiones en pines de E/S de propósito general que no están configuradas por defecto, se obliga al usuario a configurarlas si quiere utilizar alguna de estas funciones. En caso de no querer hacerlo, no tendría que configurar nada y dejaría la configuración por defecto. Toda esta cuestión, ha impuesto en cierta manera que la zona de los terminales se situará a la izquierda del conector, básicamente para así simplificar las conexiones de las señales y evitar cruces.

Como se puede intuir, habría infinidad de posibilidades para realizar este esquema. Empezando por los pines de las entradas y salidas que se conectan, que en este caso son las entradas de la 10 a la 14 (pines 42~46) y las salidas de la 35 a la 37 (pines 35~37), pero también podrían haber sido cualquiera de las otras que se encuentran en ese mismo lado.

### 5.3.2. Elección de los componentes de la placa

Una vez diseñado el esquema eléctrico de la interfaz, el siguiente paso a hacer es seleccionar los componentes que la conformarán de acuerdo a las especificaciones eléctricas marcadas. Como se ha podido ir viendo a lo largo del apartado anterior, los componentes a determinar son los terminales de conexión y el conector SCSI, cuya búsqueda se ha hecho mediante las páginas web de distintos distribuidores de electrónica, y teniendo en cuenta los precios para cada uno. Seguidamente, se comentan los componentes seleccionados y algunas de sus características:

- **Conector SCSI de 50 pines:** partiendo de la premisa que deberá soportar como mínimo una tensión y corriente máximas igual a 30 V y 100 mA. El conector escogido es el 111-050-213L001 del fabricante *NorComp*. Éste, es capaz de soportar una tensión y corriente máximas de 1000 V y 1 A, que tal y como se puede ver, cumplen perfectamente con los mínimos exigidos. Otras

de las características principales a destacar, son que está preparado para ser montado y soldado en una PCB, y que cumple con la directiva RoHS<sup>1</sup>.



**Figura 5.3.** Conector SCSI de 50 pines 111-050-213L001 del fabricante *NorComp* (Fuente [4])

- **Terminales de conexión:** de distinta forma que para el conector, en este caso se podrían diferenciar las especificaciones según sean entradas, salidas o señales de alimentación; ya que se podrían seleccionar tres tipos de bloques terminales diferentes. Pero no es el caso, ya que se ha preferido escoger tres bloques terminales iguales con diferentes números de conexiones. Por lo tanto, las características de tensión y corriente máximas de todos los bloques deberán ser como mínimo 30 V y 100 mA, respectivamente. Otra de las propiedades a definir es el método de conexión de los terminales, ya que existen varios tipos: roscados, con resorte, a presión, etc. En este caso, y siendo indiferente el método de conexión para la interfaz, se ha decidido que los terminales serían roscados. Con todo ello, los bloques terminales escogidos son: el TB004-508-05BE (5 conexiones), el TB004-508-03BE (3 conexiones) y el TB004-508-02BE (2 conexiones), todos del fabricante *CUI Devices*. Los tres, soportan un voltaje máximo de 300 V y una corriente máxima de 16 A, valores que cumplen con las especificaciones. Además, están preparados para montarse en una PCB y el rango de sección de cable que aceptan va desde 0,205 mm<sup>2</sup> a 3,31 mm<sup>2</sup>. También destacar que cumplen con la directiva RoHS.



**Figura 5.4.** Bloque terminal roscado TB004-508-03BE del fabricante *CUI Devices* (Fuente [5])

<sup>1</sup> **Directiva RoHS:** referida a la directiva europea 2011/65/UE que restringe el uso de algunas sustancias peligrosas en la fabricación de aparatos eléctricos y electrónicos.

## 5.4. Diseño del *layout* de la PCB

Antes de empezar propiamente con el diseño del *layout*<sup>1</sup> de la placa, hay que determinar de cuantas capas será el circuito impreso, ya que se puede trabajar con circuitos de una cara, doble cara o multicapa. Estos términos indican en cuantas caras o capas internas de la placa habrá pistas o trazados de cobre, y normalmente se escoge uno u otro dependiendo de la complejidad del esquema eléctrico que se tenga. En este caso, y debido a la poca complejidad y cantidad de conexiones del esquema presentado en la *figura 5.2.*, se ha decidido que el circuito será de una sola cara. Esto supone que los componentes irán ubicados en la cara superior de la placa, llamada *top*, y que el circuito y sus respectivas pistas de cobre irán en la inferior, denominada *bottom*.

Determinado esto, y considerando el esquema eléctrico y los componentes seleccionados para la interfaz, ya se puede empezar a diseñar el *layout* de la placa. Para ello, se ha utilizado el software *Eagle*, el cual a partir del esquema eléctrico establece automáticamente los enlaces y conexiones a realizar en la cara *bottom*. Además, también crea los contornos de los diferentes componentes de la cara *top* y sus *pads*<sup>2</sup>, siempre y cuando se hayan descargado antes sus respectivas huellas<sup>3</sup> desde las páginas web de los distribuidores. Este hecho es uno de los motivos por el cual los componentes han sido seleccionados antes de realizar el diseño de la placa, y no al revés.

Por lo tanto, y tras haber realizado el esquema eléctrico en *Eagle* y haber introducido las huellas de cada componente, se puede generar el *layout*. Primeramente, el software genera los contornos de cada componente y la conexión que debe haber entre sus *pads*, dejando libertad para colocar cada componente donde se quiera y para determinar las medidas de la respectiva placa. Como se podrá ir observando a lo largo de este apartado, el software utiliza un código de colores para indicar donde se ubica cada elemento del diseño. Siendo para el gris, los elementos serigrafiados en la cara *top* de la placa; para el azul, el trazado de las pistas de cobre en la cara *bottom*; y para el verde, los *pads*. En la siguiente figura, se puede ver el resultado del *layout* generado después de haber distribuido los componentes y haber establecido en 70x100 mm las medidas de la placa.

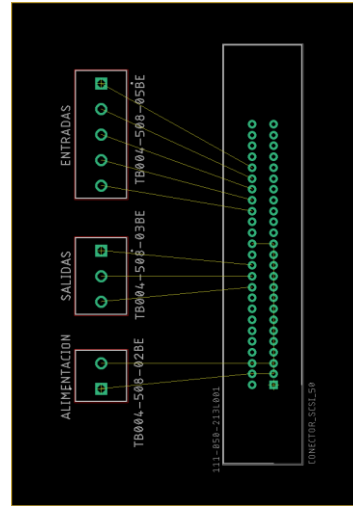
---

<sup>1</sup> **Layout:** referido al diseño físico de la placa (PCB) y el correspondiente circuito impreso.

<sup>2</sup> **Pads:** conexiones de los pines de los componentes a la placa, normalmente constituidos por un área redonda de cobre en la cara *bottom* y un agujero para introducir el terminal o pin correspondiente desde la cara *top*.

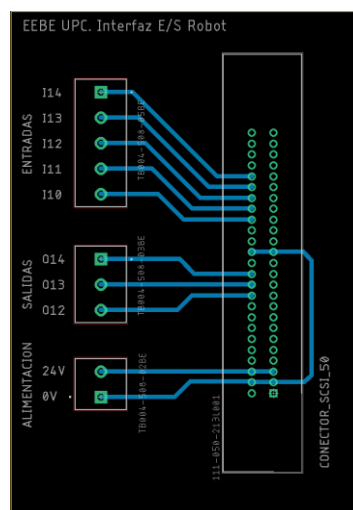
<sup>3</sup> **Huellas (footprints):** dicho de los contornos de los componentes y sus *pads* correspondientes.





**Figura 5.5.** Layout generado después de las modificaciones (escala 1:1,5)

Tal y como se puede observar, las líneas amarillas (*rats*) se corresponden con las conexiones a realizar entre los *pads*. Éstas solo tienen el objetivo de guiar a qué *pad* debe ir cada conexión, dejando a elección del diseñador el camino o traza a seguir por las pistas de cobre. La única condición que imponen, es que la pista de cobre que salga de un determinado *pad*, ha de acabar en el mismo *pad* que la línea amarilla que marca su conexión. Así pues, lo siguiente a hacer es trazar las pistas de cobre que conformarán el *layout* y acabar de perfilar algunos detalles del diseño como los nombres serigrafiados en la placa. Para las pistas de cobre, se han intentado evitar cruces y ángulos de 90º, ya que suponen puntos donde no circula bien la corriente. Además se ha establecido un ancho de la pista igual a 0,8 mm, valor suficientemente alto para permitir el paso de corriente máxima que circulará por las pistas. Teniendo en cuenta todo esto, el diseño final de la placa queda tal y como se muestra a continuación.



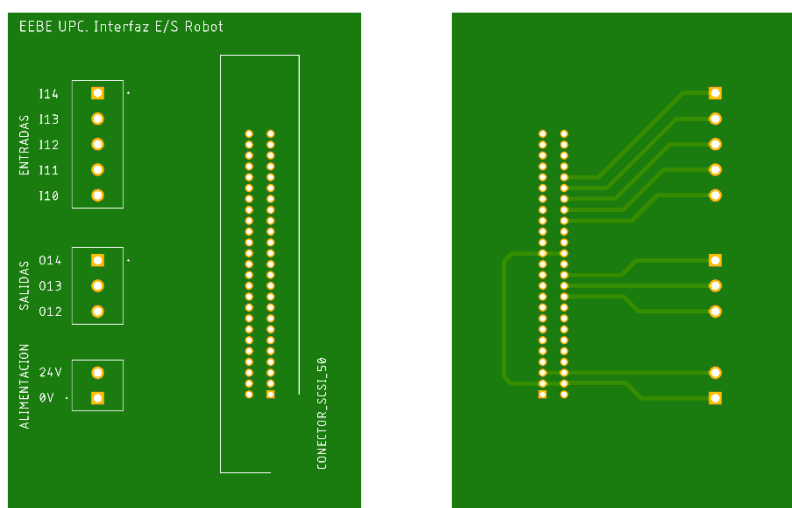
**Figura 5.6.** Diseño final de la placa PCB (escala 1:1,5)

## 5.5. Resultado final del diseño de la interfaz

En este último apartado del capítulo se trata el cómo obtener la placa a partir del diseño realizado, y se hace un pequeño comentario general sobre si se han podido cumplir todas las especificaciones marcadas y sobre aspectos que se podrían mejorar. Asimismo, se presenta un modelo 3D de la placa diseñada.

### 5.5.1. Obtención de la placa a partir del diseño

A la hora de obtener la placa a partir del diseño del *layout*, existen dos opciones diferentes. La primera, y la más utilizada, es enviar a fabricar el diseño realizado a un fabricante de circuitos impresos. Para ello, hay que generar los ficheros estándares *gerber* a través del software *Eagle*, los cuales se utilizan para enviar toda la información del diseño al fabricante. Normalmente, esta información no va en un solo fichero *gerber*, sino que hay varios tipos según contengan información de las trazas de cobre, de las serigrafías de la placa, de los agujeros, etc. *Eagle*, tiene la opción de previsualizar como quedaría el diseño una vez fabricado, y ofrece dos visualizaciones de como quedarían las dos caras de la placa.



**Figura 5.7.** Previsualización de las dos caras de la placa a fabricar (escala 1:1,5)

La segunda opción es fabricar la placa mediante el proceso de insolación, revelado y atacado de la misma, para el cual es necesario obtener el fotolito del diseño y disponer de una placa fotosensible. Esta opción es válida si se tienen los medios disponibles, aunque es más recomendable la primera opción, ya que la placa resistirá más el paso del tiempo y se asegurará un grado de calidad mayor en los trazados de las pistas de cobre, evitando así cortocircuitos o falsos contactos. En todo caso, esta segunda opción si sería validad para hacer un prototipo y hacer pruebas.

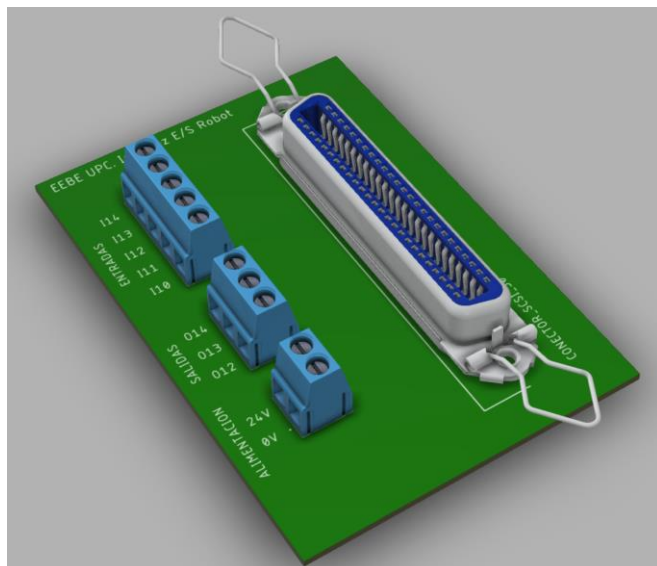
### 5.5.2. Aspectos del diseño a comentar

En primer lugar, decir que se han podido resolver todas las especificaciones requeridas para la interfaz sin ningún problema destacable. Como se ha podido ver, ésta dispone de las 5 entradas, las 3 salidas y las dos conexiones de alimentación requeridas. Además, también incorpora el conector SCSI adecuado para así poderla conectar al controlador del robot. Respecto a las especificaciones eléctricas, también se puede ver que todas son superiores a las del controlador del robot, cumpliendo así con el criterio establecido. Por lo tanto, con esta interfaz diseñada debería ser suficiente para solucionar el problema inicialmente planteado.

En relación a las posibles mejoras a realizar, se podrían haber puesto más terminales de conexiones de entradas y salidas, ya que se dispone de un total de 32. De la misma forma, la interfaz también podría incluir una fuente de alimentación pequeña que proporcionara las tensiones de alimentación de las E/S, ya que como está diseñado ahora, hace falta una fuente de alimentación externa. Por lo demás, el diseño ya cumple con sus funciones básicas.

### 5.5.3. Modelo 3D de la interfaz diseñada

Otra de las opciones que permite el software *Eagle*, es obtener el modelo 3D de la placa PCB diseñada. Para ello, solo hay que exportar el *layout* al software integrado *Fusion 360*, y añadirle los modelos en 3D de los diferentes componentes, los cuales se pueden encontrar en las diferentes páginas de los fabricantes. A continuación se muestran dos vistas diferentes del modelo desarrollado para la placa diseñada.



**Figura 5.8.** Modelo 3D de la placa PCB diseñada para la conexión de las E/S externas del robot

## 6. Diseño del sistema de seguridad de la celda

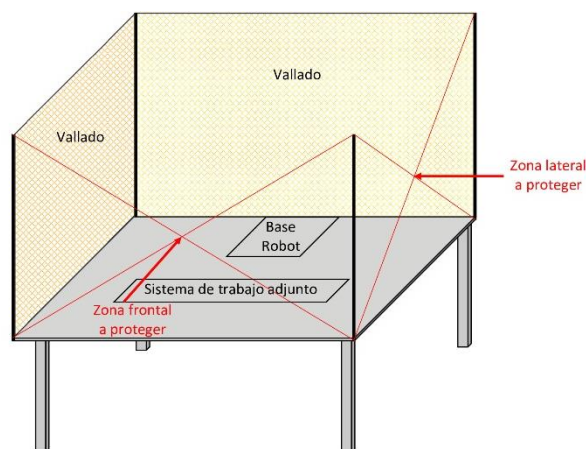
El siguiente paso en el diseño de la celda robotizada del laboratorio es el diseño de su sistema de seguridad. Tal y como se pudo ver en el capítulo 3, una celda robotizada no se podría entender sin su espacio de seguridad y las medidas de protección correspondientes, ya que el robot puede suponer un peligro potencial para las personas y para el entorno. Todas estas medidas deben cumplir y seguir estrictamente las diferentes normativas recogidas en el estándar UNE-ISO 10218-2:2011, ya que es la única manera de asegurar que se han evaluado todos los peligros existentes, y que por lo tanto, se cumplen con todos los requisitos de seguridad. En el siguiente capítulo, se especifican más detalladamente todas estas normativas y se explican las soluciones empleadas para el diseño del sistema de seguridad de la celda, separando éste en tres partes: espacio de seguridad, sistema de control de las seguridades y dispositivos de seguridad.

### 6.1. Requisitos del sistema de seguridad

En primer lugar, y desde la perspectiva del espacio de seguridad y de sus posibles accesos, hay que establecer cómo será el sistema de seguridad de la celda. Todo ello, teniendo en cuenta que en determinados casos estos requisitos no se podrán respetar, debido al incumplimiento de alguna de las normas aplicadas. Por lo que es de obligada necesidad ofrecer una solución que satisfaga al máximo los requerimientos del sistema, y que a la vez cumpla con las normas. Dicho esto, para el sistema robótico del laboratorio se establece que siempre que se pueda, el espacio de seguridad será la mesa donde se encuentra instalado el robot y su sistema de trabajo adjunto. Su protección, deberá ser preferiblemente algún tipo de vallado perimetral, como por ejemplo verjas metálicas o planchas de metacrilato, y deberán impedir el acceso de las personas a su interior.

Referente a las zonas de acceso al espacio de seguridad, deberá disponer de dos, una delante de la mesa y otra en un lateral. El primer acceso deberá ser a lo largo de la mesa, y permitirá al usuario poder hacer cualquier operación que requiera estar dentro del espacio de seguridad, como por ejemplo, modificaciones en el sistema de trabajo adjunto, grabación de posiciones del robot, operaciones de mantenimiento, etcétera. El segundo, deberá ser a lo largo del lateral, y será única y exclusivamente para la alimentación de piezas de la cinta y/o los cubiletes. Con lo cual, y haciendo un símil con una celda industrial, este acceso se correspondería con el del operario de la máquina, mientras que el primero, sería el de servicio. Ambas zonas de acceso, deberán disponer de los elementos de seguridad necesarios para saber si alguien ha accedido al espacio de seguridad a través de ellas, y así poner en marcha los mecanismos de seguridad correspondientes para asegurar la integridad de la persona en cuestión. A continuación, se muestra un pequeño boceto de la mesa con el espacio de seguridad y las

zonas de acceso comentadas, considerando que quizás se han de cambiar con tal de satisfacer todas las normativas de seguridad aplicadas.



**Figura 6.1.** Esquema inicial del espacio de seguridad a proteger y sus accesos

Por último, el sistema de seguridad deberá disponer de un indicador o algún tipo de señal lumínica o sonora, que indique el estado de la celda y si se ha activado o no alguna función de seguridad debido a una invasión del espacio de seguridad.

## 6.2. Limitación del movimiento del robot y vallado perimetral

Uno de los requisitos de la celda a diseñar es que el espacio de seguridad debe ser el correspondiente a la superficie de la mesa donde está instalado el robot. Además, éste debe estar protegido por algún tipo de vallado perimetral en todos sus límites que no sean zonas de acceso, cuya protección se verá más adelante. Teniendo en cuenta todo esto, uno de los primeros pasos a hacer es analizar qué dice la norma UNE-ISO 10218-2:2011 sobre el espacio de seguridad y el vallado, para así poder determinar cómo será finalmente el diseño de éste, y por lo tanto, si se tendrán que cambiar o no las consideraciones iniciales.

### 6.2.1. Requisitos a cumplir según la norma UNE-ISO 10218-2:2011

Para sistemas donde el espacio máximo de trabajo del robot sea más grande que el requerido para que realice sus tareas (espacio operativo), la norma UNE-ISO 10218-2:2011 en su apartado 5.4 establece que su espacio de seguridad, que en un principio debería ser igual al espacio máximo, puede ser reducido mediante la limitación del anterior. Para ello, se puede recurrir a dispositivos integrales o externos que limiten los movimientos del robot, creando así un nuevo espacio llamado espacio restringido. Esto se establece así para evitar que las protecciones perimetrales resulten en recintos innecesariamente grandes, que además sean mucho más grandes que las zonas específicas donde se

desarrollan los movimientos del robot. Este sería el caso del robot del laboratorio, en el que el espacio máximo presentado en el apartado 4.1. es más grande que el utilizado para la aplicación de la cinta y los cubiletes, y en el cual se quiere que el espacio de seguridad sea solo el correspondiente a la mesa del robot. Visto esto, y si no hay ningún otro punto que diga lo contrario, el espacio de seguridad del robot del laboratorio podrá ser el marcado en la *figura 6.1.*, siempre y cuando se apliquen los mecanismos de limitación correspondientes.

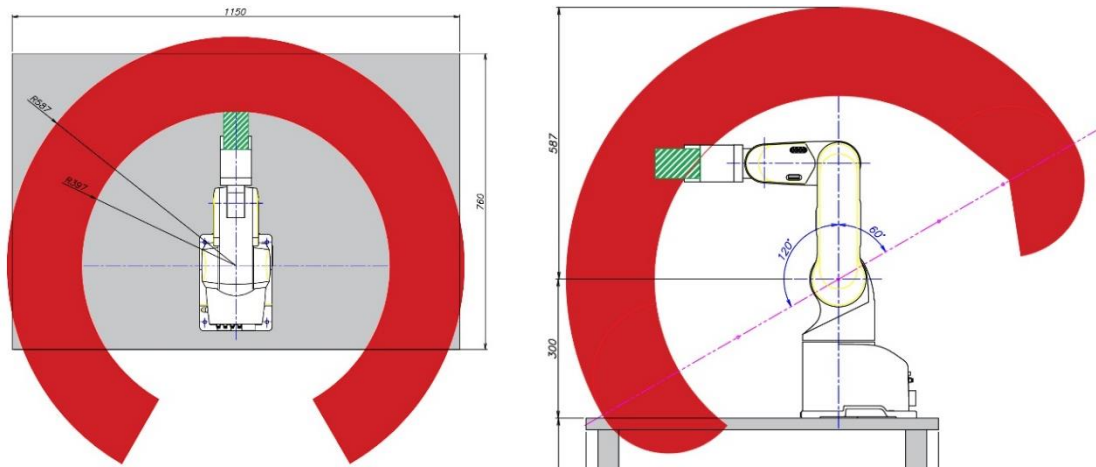
Siguiendo con el mismo apartado de la norma, y en referencia al espacio restringido, se establece que para determinarlo se deberá tener en cuenta la limitación del movimiento del robot, del elemento terminal y de la correspondiente pieza de trabajo. Además, se indica que este espacio deberá estar siempre dentro del espacio de seguridad, y que se deberá ajustar tanto como sea posible al espacio operativo. Respecto a los dispositivos para limitar el movimiento, se podrán usar: medios del robot como por ejemplo, ejes programados o características de limitación de espacios; dispositivos de limitación externos; o una combinación de ambos. Todos estos dispositivos, se pueden clasificar en dos categorías, dispositivos de limitación mecánicos y dispositivos de limitación no mecánicos. Siendo los primeros, dispositivos que restringen físicamente el movimiento a través de algún tope mecánico o similar. Y los segundos, dispositivos que restringen el movimiento a través del sistema de control del robot. Para este segundo grupo, hay que tener en cuenta un tiempo de parada del robot (en relación a su velocidad máxima), ya que tienen asociados un tiempo de respuesta.

Por lo que respecta al vallado perimetral, la norma específica en su apartado 5.10 que no podrá estar instalado dentro del espacio restringido. Asimismo, indica que sus características deberán cumplir con la norma UNE-ISO 14120:2016, y que sus distancias mínimas de seguridad se deberán determinar a partir de los requisitos de la norma UNE-ISO 13857:2008. Ésta última, incorpora una serie de tablas que permiten el cálculo de las distancias en relación a la disposición de los peligros, y que se deben cumplir, para así asegurar que no se puedan alcanzar los peligros ni por encima, ni por debajo, ni a través del vallado. En relación a la primera norma, se podría decir que está más destinada a fabricantes de vallado que no a diseñadores o integradores de sistemas robóticos.

### **6.2.2. Identificación de los espacios de la celda a diseñar**

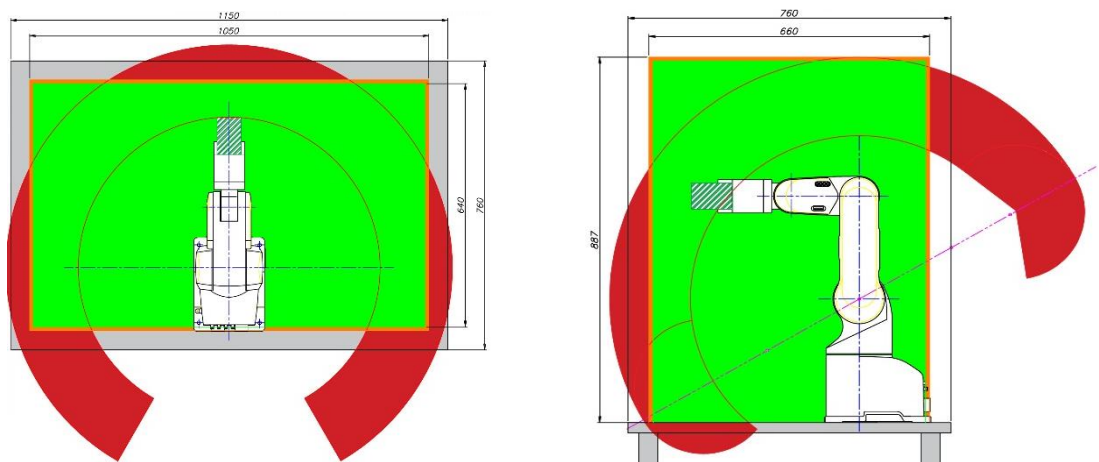
Antes de empezar a establecer cuáles serán las limitaciones de movimiento del robot y cómo será el vallado de la celda, hay que determinar cómo será el espacio restringido y el operativo. Todo ello, partiendo de que el espacio de seguridad es la mesa donde está instalado el robot, y que su espacio máximo es el presentado anteriormente más la longitud del elemento terminal y una pieza de trabajo. Como se comentó en el apartado 4, el elemento terminal es una pinza con accionamiento eléctrico que suele transportar unas pequeñas piezas de la cinta a los cubiletes. Por lo tanto, y considerando que la longitud del elemento terminal es de 107 mm, y que la pieza puede llegar a medir aproximadamente

70 mm, al espacio máximo visto habrá que sumarle 177 mm más. A continuación, se muestra el espacio máximo resultante y las medidas de la mesa, que en este caso son 760x1150x900 mm.



**Figura 6.2.** Espacio máximo resultante del robot con el elemento terminal y una pieza estándar

Tal y como se puede observar en la figura, si no se aplicaran medidas de limitación de movimientos para crear un espacio restringido, el espacio de seguridad inicialmente planteado no se podría aplicar, ya que se vería sobrepasado por el espacio máximo del robot. Dicho esto, lo primero a hacer es determinar el espacio operativo del robot, que en este caso serán todos los puntos de la mesa y de su vertical donde el robot pueda llegar, excepto aquellos que estén cerca del límite del espacio de seguridad. Esto se ha decidido así debido al uso del robot, ya que al ser un robot de uso educativo su tarea no se ciñe a una sola cosa y siempre tiene que dar la posibilidad a realizar otras tareas que no sean la de la cinta y los cubiletes. Referente al espacio restringido de la celda, será el mismo que el operativo, cumpliendo así con la premisa de la norma que dice que el espacio restringido se debe ajustar al máximo al operativo. Con todo ello, y teniendo en cuenta que se establecerá una distancia de seguridad entre el espacio restringido y el de seguridad de 50 mm, los espacios de la celda serán:



**Figura 6.3.** Espacio máximo (rojo), espacio restringido (naranja) y espacio operativo (verde) de la celda

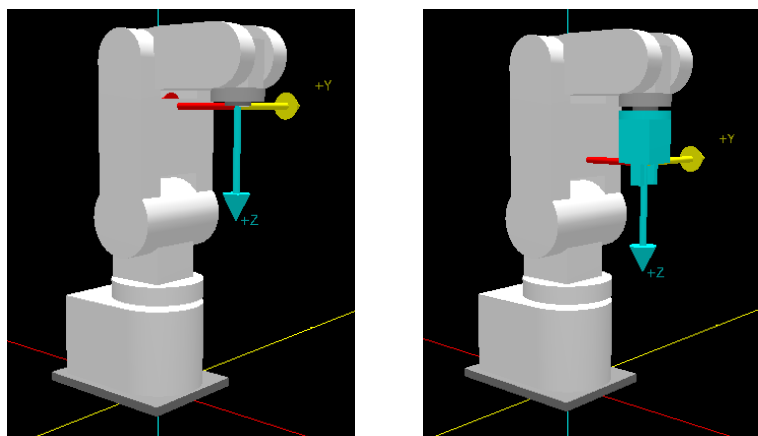
### 6.2.3. Limitación de movimiento del robot

Una vez planteado el espacio restringido de la celda, el siguiente paso a hacer es establecer los mecanismos de limitación de movimientos en base a las dimensiones del mismo. Para ello, se han considerado los mecanismos de limitación no mecánicos disponibles para el robot, y que se pueden configurar mediante el entorno de programación para robots Mitsubishi RT ToolBox2. Cabe destacar, que en ningún momento se ha considerado instalar y/o hacer uso de dispositivos mecánicos, ya que las dificultades y peligros de la propia celda son suficientemente bajos como para no hacerlo.

Los mecanismos disponibles para limitar los movimientos en el espacio del robot Mitsubishi RV-2AJ son tres diferentes, y se configuran mediante tres parámetros distintos: *motion limit*, utilizado para limitar el movimiento de los ejes del robot; *user-defined area*, para crear un área restringida donde el robot no pueda entrar; y finalmente *free plane limit*, que sirve para establecer el límite del movimiento del robot mediante la creación de un plano en el espacio. Además de éstos, hay otros parámetros para configurar la aceleración y velocidad de cada eje, pero que para establecer el espacio restringido no hace falta utilizar, y por lo tanto, no se verán. Referente a los tres parámetros anteriores, se pueden utilizar individualmente o conjuntamente, proporcionando así configuraciones de espacios más complejas y con mayor seguridad. Para el caso de la celda a diseñar se utilizarán y configurarán dos de ellos, *motion limit* y *free plane limit*, proporcionando así una configuración que haga que ni el elemento terminal con la pieza ni ningún elemento móvil del robot sobrepase el espacio restringido, tal y como marca la norma.

Antes de configurar ningún parámetro, hay que establecer dónde se encuentra el origen de coordenadas del propio robot y de su elemento terminal, ya que los parámetros anteriores dependen de ellos. Por ejemplo, un movimiento limitado con el *free plane limit*, se detiene cuando el punto de coordenadas del elemento terminal está a punto de sobrepasar el plano creado. Asimismo, su propia configuración en el espacio viene determinada en base al origen de coordenadas del robot. Por defecto, éste último se encuentra en la base del robot coincidiendo con el eje de rotación del primer eje, mientras que el punto de coordenadas del elemento terminal, se encuentra en el extremo del brazo del robot. Estos dos puntos de coordenadas se pueden configurar mediante el parámetro *Tool*, y su utilidad principal es poder referenciar el punto del terminal al extremo del terminal instalado. Esto supone varias ventajas, ya que facilita la configuración de la limitación de movimientos mediante los parámetros *free plane limit* o *user-defined area*, y además facilita también la referenciación de posiciones del robot, ya que en ellas no habrá que tener en cuenta el excedente provocado por el elemento terminal. Por todo ello, en el robot de la celda se ha configurado el punto de coordenadas del terminal para que coincida con la base de la pinza, tal y como se muestra a continuación.





**Figura 6.4.** Puntos de coordenadas por defecto (izquierda) y puntos configurados mediante *Tool* (derecha)

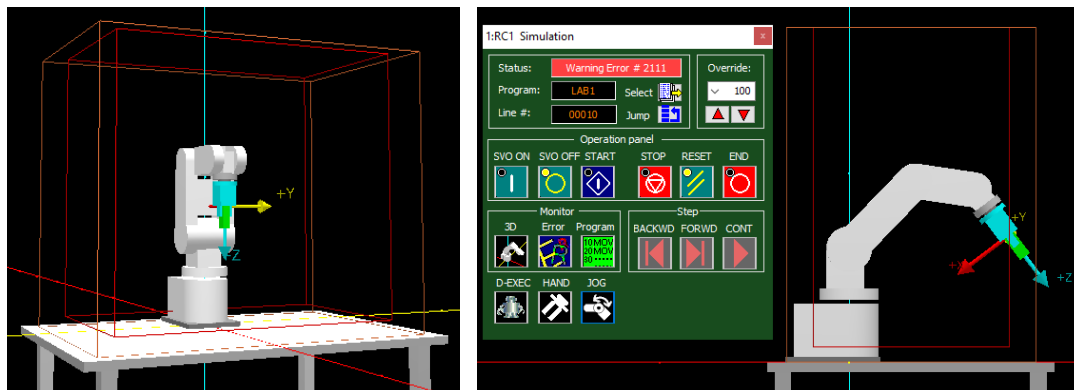
En la figura, además de ver el nuevo punto de coordenadas para el terminal, se puede ver una reproducción a escala del terminal hecha con el visualizador 3D del propio RT ToolBox2. Ahora sí, considerando este nuevo punto de coordenadas, se puede pasar a configurar los parámetros de limitación de movimientos:

- **Free plane limit:** para configurar este parámetro y crear los planos límite, hay que introducir tres puntos diferentes de cada plano, e indicar si la zona permitida es del plano hacia el origen de coordenadas, o al revés. En el caso de la celda habrá cinco planos diferentes, uno por cada lateral del espacio restringido y otro para la superficie de la mesa, evitando así que el robot choque con ella. Respecto al límite superior, al haber fijado el espacio restringido igual al límite máximo del robot, no hará falta configurar nada, ya que los propios límites físicos del robot no permitirán sobrepasar la altura máxima. Dicho esto, los planos laterales se establecerán a 70 mm de separación del límite del espacio restringido, ya que el punto de coordenadas del terminal está en la base de la pinza y no en el extremo de la posible pieza. Por otro lado, el plano de la superficie de la mesa se situará a solo 40 mm de separación, para así facilitar la cogida de piezas en la superficie que sean más pequeñas de 70 mm. Por lo tanto, y considerando que el origen de coordenadas del robot se sitúa a 215,5 mm de la parte trasera de la mesa, y a 575 mm de los laterales, los puntos y configuración de los planos serán:

Ubicación de los puntos del plano y configuración para el parámetro <i>free plane limit</i>		
Planos	Coordenadas de los puntos	Configuración
Plano delantero	A 424,5 mm del origen en X	Zona permitida hacia origen
Plano trasero	A -95,5 mm del origen en X	Zona permitida hacia origen
Plano lateral 1	A 455 mm del origen en Y	Zona permitida hacia origen
Plano lateral 2	A -455 mm del origen en Y	Zona permitida hacia origen
Plano inferior	A 40 mm del origen en Z	Zona permitida hacia exterior

**Tabla 6.1.** Configuración de los planos del parámetro *free plane limit*

Tal y como se puede ver en la tabla solo se ha especificado la distancia de los puntos al origen en un solo eje, y es que al crearse un plano infinito, el resto de distancias siempre dará igual. Seguidamente se muestra la zona creada por la intersección de los planos, y una simulación de su funcionamiento hecha con el simulador 3D de RT ToolBox2, donde además se puede observar el error que saltará en el controlador cuando se intente sobrepasar uno de estos planos.



**Figura 6.5.** Resultados de la configuración del parámetro *free plane limit*

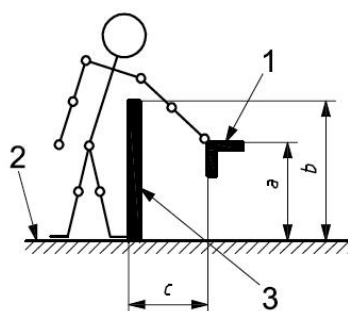
En la figura se puede ver el espacio restringido en marrón y el creado por la intersección de los planos en rojo. Otro de los aspectos que también se pueden observar, es como el movimiento del robot se ha parado justo cuando el punto de coordenadas del terminal ha ido a cruzar el plano límite, y como la pieza en ningún momento sobrepasa el espacio restringido.

- **Motion limit:** una vez definido la limitación por el parámetro *free plane limit*, y tras varias simulaciones, se ha visto que hay unas configuraciones de los ejes 2 y 3 que hacen que elementos móviles del brazo sobresalgan del espacio restringido por el plano trasero. Según la normativa, esto no puede pasar, y es por ello que hay que aplicar otras medidas como la limitación de movimiento de ejes. Para configurar esta nueva limitación, se utiliza el parámetro *motion limit*, en el cual se introduce que margen de movimiento en grados tiene cada eje. En este caso, se ha determinado que el eje 2 tendrá un recorrido de  $-20^\circ$  a  $120^\circ$ , y el eje 3 de  $20^\circ$  a  $120^\circ$ . Con esta configuración, se debería seguir pudiendo hacer cualquier operación encima de la mesa y quedarían restringidas las operaciones que se pudieran hacer por detrás del tronco principal del robot, que actualmente y sin seguridades ya serían muy pocas, dada la ubicación del robot en la mesa.

#### 6.2.4. Protección y vallado perimetral de las zonas no accesibles

Las protecciones perimetrales de una celda robotizada deben evitar o detectar el acceso de cualquier persona al espacio de seguridad del robot, con el objetivo de minimizar aún más los riesgos que pueden suponer este tipo de instalaciones. Por lo general, estas protecciones pueden ser barreras o dispositivos de protección, y su uso dependerá de la frecuencia de acceso que tengan. Para zonas donde no haya ningún tipo de acceso, se utilizarán barreras o dispositivos fijos, mientras que para las zonas donde debe haber un acceso controlado, se instalarán dispositivos de protección como sensores, detectores, puertas, etcétera. En este subapartado, se tratarán las protecciones usadas para las zonas donde no habrá ningún tipo de acceso, dejando así las otras zonas y sus respectivos dispositivos de protección para los siguientes apartados, donde se analizarán sus respectivas normativas, los elementos de control y detección que deben incorporar, y su disposición en la celda.

Considerando esto, y centrando la atención en las barreras o vallado perimetral, una de las primeras cosas a hacer es determinar las dimensiones del mismo de acuerdo a la normativa. Para ello, hay que tener en cuenta que el vallado debe corresponderse con el perímetro del espacio de seguridad, y que sus dimensiones deben cumplir con los requisitos de la norma UNE-ISO 13857:2008. Por lo tanto, y teniendo en cuenta que el vallado se instalará tal y como se indica la *figura 6.1.*, se puede determinar que los dos paneles de vallado deberán tener una longitud de 1150 mm y 760 mm, respectivamente. Referente a su altura, vendrá determinada por el apartado 4.2.2 de la norma citada, donde se adjunta un diagrama (*figura 6.6.*) y una tabla (*tabla 6.2.*) que permiten obtener las distancias de seguridad mínimas para impedir que se alcancen los peligros por encima de las estructuras de protección.



- $a$  altura de la zona peligrosa
- $b$  altura de la estructura de protección
- $c$  distancia de seguridad horizontal con respecto a la zona peligrosa
- 1 zona peligros (punto más cercano)
- 2 plano de referencia
- 3 altura de la zona peligrosa

**Figura 6.6.** Alcance por encima de una estructura de protección  
(Fuente [13]. Figura 2 (pág. 10))

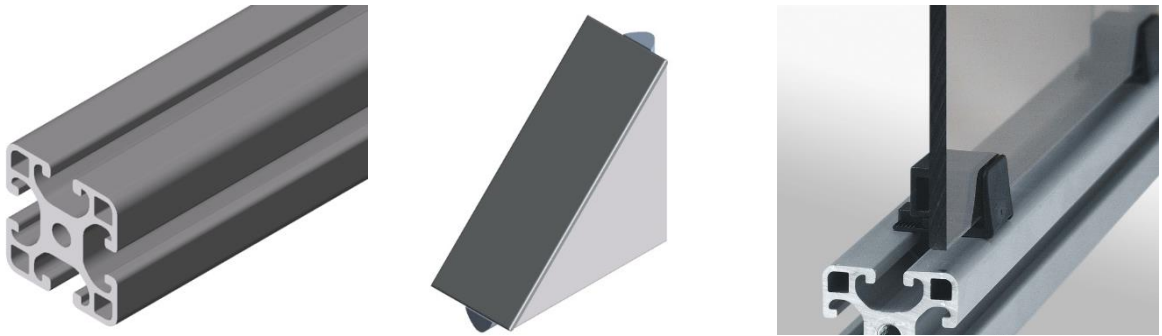
Altura de la zona peligrosa $a$	Altura de la estructura de protección $b$				Medidas en mm
	1400	1600	1800	2000	2200
Distancia de seguridad horizontal a zona peligrosa $c$					
2000	700	600	500	350	0
1800	900	900	600	0	0
1600	900	900	500	0	0
1400	900	800	100	0	0

**Tabla 6.2.** Alturas para evitar el alcance por encima de las estructuras de protección  
(Fuente [13]. Parte de la tabla 1 (pág. 11))

En vista de la figura y de la tabla anterior, primeramente se han de identificar las alturas del diagrama en el sistema del laboratorio, para así después determinar la altura de la protección con la tabla. Con lo cual, considerando las medidas expuestas en el apartado 6.2.2, se puede determinar que la distancia  $a$  será igual a la altura de la mesa (900 mm) más la altura de la zona restringida (887 mm), resultando así un total de 1787 mm. Respecto a la distancia  $c$ , será igual a 0 mm, ya que la protección se situará en el límite del espacio de seguridad. Identificadas estas alturas, ya se puede buscar en la tabla que altura de las protecciones  $b$  deberán tener los paneles del vallado. Tal y como se puede ver, la altura  $a$  no se encuentra en la tabla, por lo que habrá que escoger el valor inmediatamente superior, y nunca el inferior. Por lo tanto, cogiendo un valor  $a$  de 1800 mm y un  $c$  de 0 mm, la altura de las protecciones  $b$  deberá ser igual a 2000 mm. Como se puede ver en la figura, esta altura obtenida es respecto el suelo, con lo cual, la altura del vallado deberá ser igual a  $b$  menos la altura de la mesa, obteniendo así una altura igual a 1100 mm.

Una vez determinadas las dimensiones de los paneles, iguales a 1150x1100 mm y 760x1100 mm, hay que decidir qué tipo de vallado se instalará, teniendo en cuenta que el que se elija deberá cumplir con la norma UNE-ISO 14120:2016. Tradicionalmente, en la industria se han usado paneles de malla de alambre para este tipo de cerramientos, pero en los últimos años, el uso de paneles de policarbonato y metacrilato ha experimentado un gran crecimiento. Estos últimos proporcionan la misma resistencia que las mallas, pero al ser completamente transparentes hacen que los espacios donde están instalados los robots sean más diáfanos y más accesibles visualmente. Otra de las ventajas, es que no hace falta encontrar paneles con las medidas exactas de la instalación, ya que este tipo de material puede ser cortado con una sierra, y por lo tanto se puede adaptar fácilmente a las necesidades requeridas. Debido a todo esto, se ha decidido que el vallado de la celda estará formado por dos paneles de policarbonato sólido y su correspondiente estructura de aluminio.

Para la estructura, se utilizarán cuatro perfiles de aluminio de 40x40 mm y de 1100 mm de longitud, que se instalarán en cada esquina de la mesa y servirán para sujetar los dos paneles de policarbonato y los dispositivos de protección de las zonas de acceso. Todos estos perfiles estarán anclados a la mesa mediante 8 escuadras de 80x80 mm, dos por cada perfil, y se unirán a los perfiles de aluminio y a la mesa mediante tornillos de M8x18 mm y M8x35 mm, respectivamente. Para la unión del perfil con la escuadra, además del tornillo, harán falta las correspondientes tuercas adaptadas a la perfilera, llamadas tuercas cajeadas. En robótica, existen muchas empresas dedicadas a las estructuras de aluminio de este tipo, conocidas como sistemas modulares, por lo tanto la estructura presentada se podría realizar con cualquier fabricante siempre y cuando se respeten las medidas marcadas. Igualmente, a continuación se presentan una serie de elementos del fabricante item Industrietechnik con los cuales se podría implementar el diseño expuesto, y con los cuales se ha hecho el diseño 3D de la celda. Todos estos elementos corresponden a la serie 8 del fabricante, y son: perfiles 8 40x40 L (*figura 6.7-1*); kits escuadra X8 80x80 (*figura 6.7-2*); y bridas Multiblock 8 PA (*figura 6.7-3*).



**Figura 6.7.** Elementos del fabricante item Industrietechnik para el vallado perimetral de la celda (Fuente [6])

Por último, los paneles de policarbonato deberán ser transparentes y deberán tener un grosor de 4 mm. Por otra parte, sus dimensiones serán algo más pequeñas que las dichas anteriormente, ya que no se habían tenido en cuenta la anchura de los perfiles con los fijadores. Asimismo, la forma de los paneles se tendrá que adaptar a las escuadras que se instalarán en las bases de los perfiles de sujeción.

### 6.3. Normativa y estructura del sistema de control de seguridad

Como ya se ha dicho, la protección perimetral de la celda se compone por el vallado y las respectivas protecciones. Una vez establecido el vallado fijo, hay que diseñar cómo será el sistema de los dispositivos de protección, llamados equipos de protección sensible, de las zonas donde se requiere algún tipo de acceso. Normalmente, estos sistemas se diseñan para llevar a cabo funciones de seguridad que tienen como objetivo reducir al mínimo los riesgos que puede comportar una máquina. En el caso de los accesos de una celda robotizada, esto se traduce en detectar el acceso de una persona para así poner en marcha mecanismos que hagan que los peligros de la celda remitan antes de que llegue al espacio restringido, o que simplemente, eviten funcionamientos imprevistos cuando alguien se encuentra dentro del mismo. Todo ello, implica que en este tipo de sistemas haya equipos de control que monitoricen los equipos de protección sensible y se encarguen de poner en funcionamiento los diferentes mecanismos de seguridad, normalmente paradas de emergencia o de seguridad.

Según la norma UNE-ISO 10218-2:2011, estos sistemas están descritos conforme a dos normas, las cuales tratan los mismos aspectos con metodología diferente. La elección de una u otra a la hora de evaluar o diseñar una instalación, viene determinada única y exclusivamente por el diseñador, ya que al tratar los mismos aspectos, siempre se estaría cumpliendo con los mismos requisitos de seguridad. Las dos normas referidas anteriormente son la UNE-ISO 13849-1:2016 y la UNE 62061:2005. En la primera, se tratan los sistemas de control de seguridad según su categoría de estructura y nivel de prestación (PL); mientras que en la segunda, según su nivel de integridad de seguridad (SIL) y los requisitos de tolerancia a fallos del hardware.

Conforme a ello, la norma UNE-ISO 10218-2:2011, establece que los sistemas de control de seguridad de las celdas robotizadas deben estar diseñados para cumplir con una categoría de estructura 3 y un PL=d; o con un SIL 2 y una tolerancia de fallo del hardware 1. Teniendo en cuenta esto, la norma seleccionada para el diseño del sistema de control de seguridad de la celda ha sido la UNE-ISO 13849-1:2016, debido a su condición de internacionalidad y fecha de publicación, algo más reciente. Como se puede ver en la nomenclatura de las normas, la primera está reconocida por la ISO, y por lo tanto se podría encontrar en cualquier otro país. Mientras que la segunda solo está reconocida por la AENOR, y aunque se base en un estándar internacional, podría diferir en algunas cosas respecto otras normas de otros países.

### 6.3.1. Requisitos a cumplir según la norma UNE-ISO 13849-1:2016

Con tal de cumplir con la normativa seleccionada, las partes de los sistemas de control encargadas de la seguridad (SRP/CS), deben estar diseñadas de manera que un único fallo en cualquiera de estas partes no conlleve una pérdida de la función de seguridad. En otras palabras, si algún elemento falla, no puede derivar en un fallo general del sistema de seguridad de la celda. Con lo cual, y siempre que sea posible, se deberá detectar el fallo antes o durante la siguiente solicitud de la función de seguridad de un elemento. Una vez detectado el fallo, el sistema de control debe poner la función de seguridad en marcha y mantener el estado de seguridad hasta que el fallo sea corregido. Cabe destacar, que para los sistemas de categoría 3 la norma no obliga a la detección de todos los fallos, sino que solo algunos. Por ello, se indica que puede haber una pérdida de la función de seguridad debido a la acumulación de fallos no detectados. En sistemas con exigencia de mayor categoría, sí se obliga a la detección de todos los fallos, sea factible o no.

De acuerdo con la norma UNE-ISO 13849-1:2016, todas estas especificaciones técnicas obligan a que los componentes del sistema de control de seguridad tengan una cobertura del diagnóstico ( $DC_{avg}$ ) y un tiempo medio hasta el fallo peligroso de cada canal ( $MTTF_D$ ), de acuerdo con la categoría y el PL del sistema a diseñar. A continuación, se adjunta una tabla que relaciona la categoría y el PL, con las exigencias mínimas de la  $DC_{avg}$  y del  $MTTF_D$ . Asimismo, se marcan las opciones existentes para el diseño de un sistema con categoría 3 y PL=d.

Categoría	B	1	2	2	3	3	4
$DC_{avg}$	Nula	Nula	Baja	Media	Baja	Media	Alta
<b>MTTF<sub>D</sub> de cada canal</b>							
Bajo	a	-	a	b	b	c	-
Medio	b	-	b	c	c	d	-
Alto	-	c	c	d	d	d	e

**Tabla 6.3.** Procedimiento simplificado para evaluar el PL obtenido por la SRP/CS

(Fuente [14]. Tabla 6 (pág. 29))

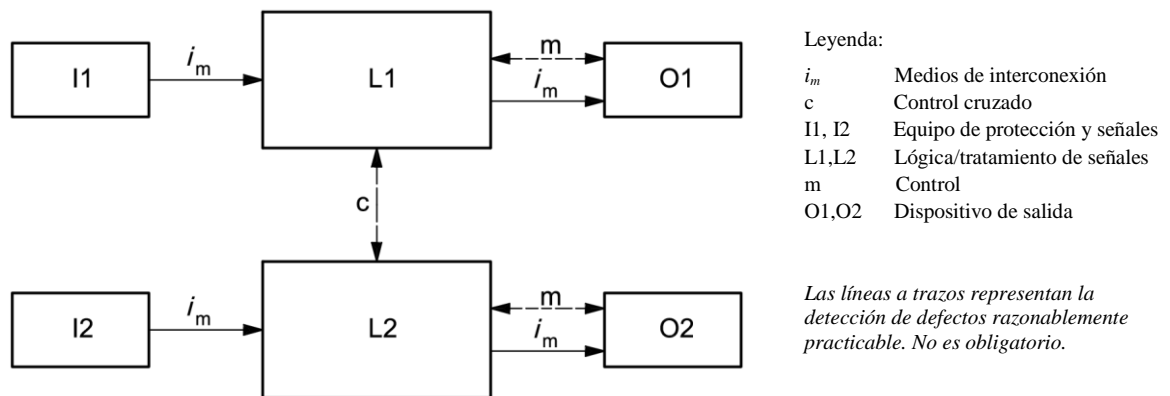


Tal y como se puede ver, para las SRP/CS del sistema de seguridad de la celda, existen tres opciones: una cobertura de diagnóstico baja y un tiempo de fallo alto, o una cobertura media y un tiempo medio o alto. Estos índices, están relacionados con intervalos de porcentaje para la  $DC_{avg}$ , y con intervalos de tiempo para el  $MTTF_D$ . Todo ello, queda recogido en la misma norma y se expone en las tablas adjuntadas a continuación.

$DC_{avg}$		$MTTF_D$	
Índice	Gama	Índice para cada canal	Gama para cada canal
Nula	$DC < 60\%$	Bajo	$3 \text{ años} < MTTF_D < 10 \text{ años}$
Baja	$60\% < DC < 90\%$	Medio	$10 \text{ años} < MTTF_D < 30 \text{ años}$
Media	$90\% < DC < 99\%$	Alto	$10 \text{ años} < MTTF_D < 100 \text{ años}$
Alta	$99\% < DC$		

**Tabla 6.4.** Tablas de indexado de la cobertura del diagnóstico (DC) y del tiempo medio de fallo ( $MTTF_D$ )  
(Fuente [14]. Tablas 4 y 5 (págs. 26-27))

Por último, la norma UNE-ISO 13849-1:2016, indica que para obtener una estructura de las SRP/CS con una categoría 3 y un  $PL=d$  que evite, detecte o tolere posibles fallos, es altamente recomendable el uso de arquitecturas redundantes. Esto, afecta a todas las SRP/CS que conforman el sistema de control de seguridad, desde la redundancia de las señales de los equipos de protección sensible hasta la de los circuitos internos de las partes que monitorean sus estados. Todo ello, queda reflejado en la siguiente arquitectura tipo:



**Figura 6.8.** Arquitectura tipo para un sistema con categoría de estructura 3 y  $PL=d$   
(Fuente [14]. Figura 11 (pág. 48))

Aunque en la figura no se indique, generalmente los dispositivos de entrada o equipos de protección sensible se marcan como SRP/CS<sub>a</sub>, los de lógica y tratamiento de señales como SRP/CS<sub>b</sub> y finalmente los de salida como SRP/CS<sub>c</sub>.

## 6.4. Equipos de protección sensible (SRP/CS<sub>a</sub>)

Los equipos de protección sensible son los encargados de detectar el acceso de las personas a la celda y enviar las señales de petición de las funciones de seguridad al equipo que los monitoriza. Según el tipo de protección que dispongan, se pueden clasificar en dos tipos: equipos de protección electrosensibles (ESPE) o equipos de protección sensibles a la presión, y su elección, viene marcada por cuestiones ergonómicas de la celda y/o por el tipo de acceso que protejan y su frecuencia de uso. Como ejemplos de ellos, se pueden encontrar sensores de detección, cortinas fotoeléctricas, escáneres láser, bordes sensibles a la presión, alfombras de seguridad, etcétera.

Respecto a la normativa que han de seguir, además de cumplir con la  $DC_{avg}$  y el  $MTTF_D$  marcados por las exigencias de categoría y nivel de prestación del sistema, han de cumplir con otros principios de la norma UNE-ISO 10218-2:2011. Esta última, en su apartado 5.10.5.1, indica que los equipos de protección sensible seleccionados para la celda deberán cumplir con la norma IEC<sup>1</sup> 61496-1 o la ISO 13856, dependiendo de si son ESPE o equipos de protección sensibles a la presión. Asimismo, en los apartados 5.10.5.2 y 5.10.5.3, se marca cómo deben estar instalados y qué criterios hay que seguir para determinar la distancia entre el equipo y la zona de peligro. Pero todo ello, se analizará más adelante debido a que todos los criterios están basados en la totalidad del sistema de seguridad y sus tiempos de respuesta. Referente al funcionamiento de estos dispositivos, deben activarse cuando alguien traspase su zona de protección y mantenerse activos hasta que no detecten nada.

### 6.4.1. Equipo de protección para el acceso lateral: cortina fotoeléctrica

Para la protección del acceso lateral de la celda, el cual se utilizará para alimentar la cinta y/o los cubiletes, se aprovechará una cortina fotoeléctrica de seguridad modelo F3SJ-A0245P30 cedida por el fabricante Omron a la escuela. Una de sus características más importantes es la capacidad de detectar manos o brazos, o generalmente objetos de más de 30 mm, en un rango máximo de 9 m y en una altura protegida de 245 mm. Dicho de otro modo, la cortina es capaz de detectar cualquier objeto de 30 mm que traspase el plano creado por el emisor y receptor de la cortina (*figura 6.9.*), que en este caso, tiene una altura fija



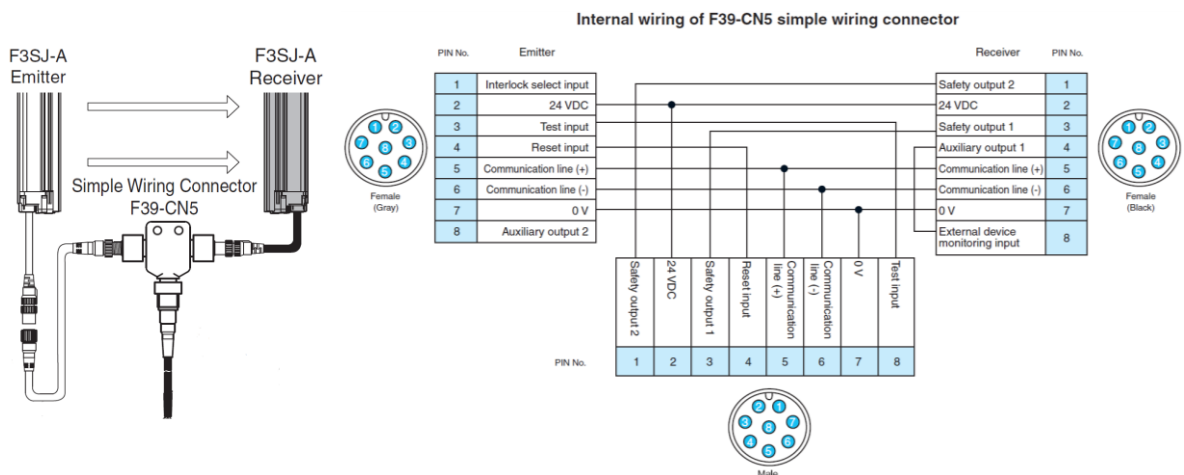
**Figura 6.9.** Ejemplo de detección para la cortina de seguridad F3SJ-A0245P30  
(Fuente [1-15])

<sup>1</sup> IEC: referido a las normas que desarrollan conjuntamente la ISO y la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC).



de 245 mm y un ancho dependiente de la distancia a la cual se sitúen receptor y emisor, que como máximo podrá ser de 9 m. Por todo ello, se ha optado por el uso de este dispositivo en el acceso lateral, y es que permitirá detectar una posible mano que traspase el espacio de seguridad para retirar o introducir alguna pieza de la cinta o los cubiletes, y además, permitirá crear un espacio lo suficientemente pequeño como para que solo se pueda introducir la mano o el brazo. Por otra parte, y correspondiéndose con los requisitos normativos, el modelo cumple con la norma IEC 61496-1 y está preparado para su uso en sistemas con requerimientos de categoría de estructura 4 y PL=e, lo cual está por encima de las especificaciones mínimas exigidas.

La conexión del emisor y del receptor se hace mediante dos conectores macho roscados de métrico 12 y 8 pines (M12 8-pin) independientes, lo que supondría un volumen de cableado alto si la conexión se hiciera directamente con los dos conectores. Por ello, se utilizará el conector Omron F39-CN5, que permite la interconexión del emisor y del receptor en un solo conector macho M12 8-pin. Esto, además de reducir el cableado a la mitad, permitirá simplificar la conexión de la cortina fotoeléctrica al sistema y obtener las señales de interés, tal y como se puede ver a continuación.



**Figura 6.10.** Conexión e interconexiones internas del conector F39-CN5 de la marca Omron (Fuente [1-17])

En relación a las señales de interés obtenidas de la interconexión, son las correspondientes a los 8 pines del conector macho, y tal y como se puede ver en la figura se pueden distinguir entre señales de seguridad (OSSD), pines 1 y 3; señales de mantenimiento, pines 4, 5, 6 y 8; y señales de alimentación, pines 2 y 7. Por un lado, las dos OSSD son las que irán conectadas al equipo que monitoree la cortina, y estarán activas (24 Vdc) siempre y cuando no se detecte nada en la zona de detección. Este comportamiento, diferente al de la gran mayoría de sensores estándares, es debido a que al ser un dispositivo de seguridad ha de garantizar que nunca haya una pérdida de la función de seguridad, incluso si tiene algún defecto. Por ejemplo, si la cortina se dañara lo primero que fallaría sería la tensión de 24 Vdc, con lo cual la cortina en sus salidas daría una señal de 0 V indicando así que se ha de activar

la función de seguridad de la celda. Con esto, se permite que el sistema de control de seguridad detecte las intrusiones en el espacio de seguridad de la celda, y además detecte los posibles fallos de los dispositivos. Por otro lado, se encuentran las señales dedicadas al mantenimiento, siendo la señal de reset para reiniciar el dispositivo, la de test para verificar que funciona correctamente y las de comunicación para conectar el dispositivo a un ordenador. En un principio todas estas señales no se usarán, y por lo tanto, y tal y como indica el fabricante, la señal de reset irá conectada a 24 Vdc, la de test a 0 V y las de comunicación quedarán aisladas de cualquier voltaje. Por último, se encuentran las señales de alimentación, que deben proporcionar los 24 Vdc y los 144 mA que consumen emisor y receptor.

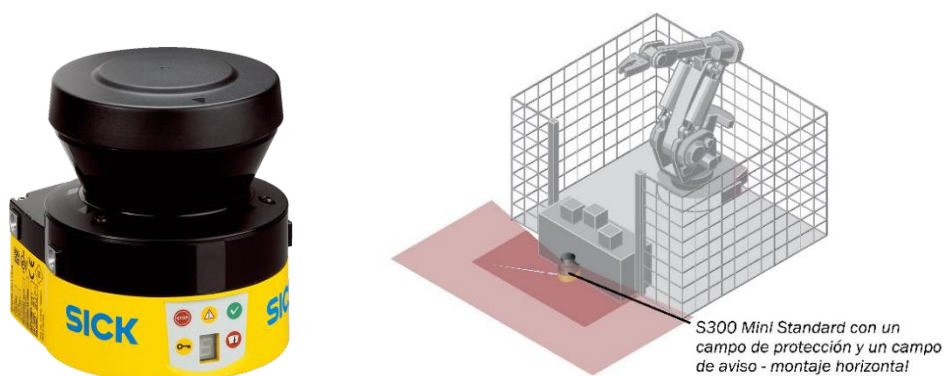
#### **6.4.2. Equipo de protección para el acceso frontal: alfombras y escáneres láser**

De la misma forma que en el acceso lateral interesaba crear un espacio mínimo suficiente como para que solo se pudiera introducir una mano o un brazo, en este caso, interesa un acceso totalmente abierto que permita entrar completamente en el espacio de seguridad, y que además posibilite la visualización de la operación del robot sin ningún obstáculo delante. Teniendo en cuenta el uso educativo del robot, esto significa que habrá personas circulando y aproximándose a dicho acceso, y que en cualquier momento podrían caer dentro del espacio de seguridad del robot, lo que hace que una protección basada en una cortina fotoeléctrica o en algún dispositivo similar se haga insuficiente o insegura. En el acceso lateral, esto no supone un problema, ya que al estar reducido el espacio de entrada al mínimo la persona que quiera acceder lo ha de hacer conscientemente.

Dicho esto, hay que buscar un dispositivo de protección alternativo que permita la detección de personas en un área adyacente al acceso, y no en su mismo plano. Para ello, existen dos tipos de dispositivos ampliamente usados en la industria, los escáneres láser y las alfombras de seguridad. Los primeros, considerados dispositivos de protección optoelectrónicos sensibles a reflexiones difusas (AOPDDR), se basan en unos haces de luz láser que escanean la superficie de detección y que se reflejan cuando se encuentran con un objeto o una persona. Mientras que los segundos, son equipos sensibles a la presión, que actúan como interruptores abiertos o cerrados dependiendo de la presión que se ejerza sobre ellos. En un principio, se podría hacer uso de cualquiera de los dos para la protección del acceso frontal, pero el uso de escáneres láser ofrece una serie de ventajas sobre las alfombras de seguridad que hay que tener en cuenta. Por una parte, el escáner no sufre el desgaste físico y operativo que puede llegar a sufrir una alfombra, lo cual hace que su tiempo de vida útil sea bastante mayor. Por otra parte, el escáner incorpora campos de detección configurables que permiten ajustar fácilmente la zona de detección a cualquier sistema y lugar donde se quiera instalar. Y por último, también se pueden configurar campos de aviso, los cuales permiten iniciar una advertencia (sonora o visible) para así prevenir que las personas invadan involuntariamente la zona de detección y el robot se tenga que

parar. El mayor inconveniente de estos escáneres es su precio, bastante superior al de las alfombras, pero al tener mayor vida útil al final el coste a largo plazo acaba siendo el mismo.

Por todo ello, y considerando que el acceso tendrá mucho estrés operativo debido al uso educativo del robot, se ha decidido que la protección del acceso frontal se hará con un escáner láser. Éste, además de cumplir con todas las especificaciones normativas, deberá tener un ángulo de escaneo mínimo de 180° y un alcance mínimo de 2 m, para así asegurar que las medidas del campo que se determinen más adelante podrán ser aplicadas. Atendiendo a todo esto, el escáner láser escogido para la protección frontal será el escáner S32B-3011BA S300 mini standard de la marca Sick, y sus características principales son: un alcance máximo del campo de protección de 3 m, un ángulo de escaneo de 270° y una resolución configurable capaz de detectar desde brazos (30 mm) hasta cuerpos (150 mm). Además, el escáner cumple con la norma IEC 61496-1 y está preparado para su uso en sistemas de categoría de estructura 3 y PL=d, lo que es igual a las especificaciones mínimas exigidas.



**Figura 6.11.** Escáner láser Sick S32B-3011BA S300 mini y ejemplo de aplicación similar al de la celda  
(Fuentes [1-11] [1-16])

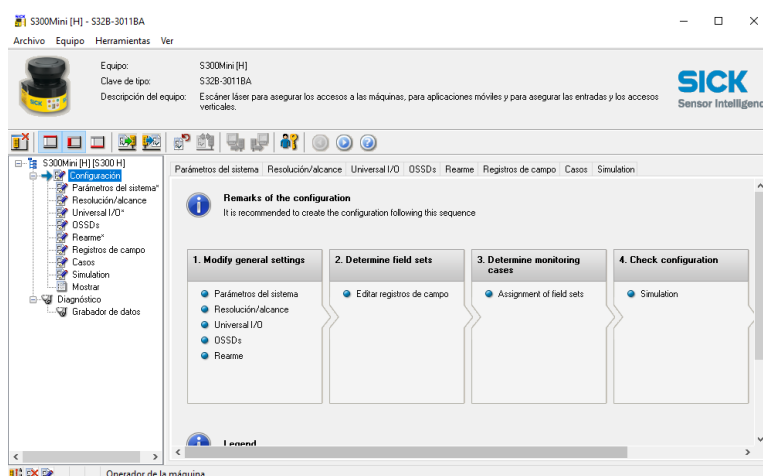
Respecto a su conexionado, se hace mediante un cable de 250 mm con un conector macho roscado M12 8-pin, donde cada pin se corresponde a las siguientes señales:

Ocupación de pines del conector M12 8-pin del escáner S300 Mini		
Pin	Señal	Función
1	CA	Salida de estado del campo de aviso
2	24 Vdc	Tensión de alimentación del dispositivo
3	E/S 1	E/S universal 1 ( <i>configurable</i> )
4	E/S 2	E/S universal 2 ( <i>configurable</i> )
5	OSSD1	Salida de conmutación o seguridad 1
6	OSSD2	Salida de conmutación o seguridad 2
7	0 Vdc	Tensión de alimentación
8	TF	Tierra funcional

**Tabla 6.5.** Ocupación de pines para el conector del escáner S32B-3011BA S300 mini  
(Fuente [1-16]. Tabla 18 (pág. 78))

En este caso, y de la misma forma que para la cortina fotoeléctrica, las salidas de seguridad (OSSD) son las que irán conectadas al equipo de control que monitoriza el escáner. Además, estarán activadas (24 Vdc) cuando el campo de protección esté libre, y desactivadas (0 Vdc) cuando el campo esté ocupado. En cuanto a las E/S universales, son dos conexiones que se pueden configurar como entradas o salidas, y que sirven para llevar a cabo funciones como el stand by<sup>1</sup> del dispositivo o para avisar del estado del mismo. Por último, la señal de estado del campo de aviso sirve para indicar si éste está libre o no, y aunque el mismo escáner incorpore un aviso luminoso, su principal función es la de activar algún otro dispositivo exterior de aviso.

La configuración del escáner se hace a través de un cable de servicio y un ordenador con el software CDS (Software de Configuración y Diagnóstico) de Sick. Con él, además de configurar los campos de detección y aviso, se pueden configurar otros parámetros como la resolución, el rearme del dispositivo o las E/S universales vistas. En este caso, se ha querido dar la misma funcionalidad que a la cortina fotoeléctrica, y por ello el rearme del dispositivo (reset) no se configurará. En relación a las E/S universales también se prescindirá de ellas, ya que las funcionalidades y avisos sobre el estado del dispositivo que ofrecen, son extras y se pueden divisar en los indicadores luminosos del mismo escáner. Finalmente, la resolución se configurará para la detección de piernas (70 mm), ya que el dispositivo estará instalado a poca altura del suelo.



**Figura 6.12.** Pantalla principal del software CDS de Sick para la configuración del escáner láser S300 mini

Los campos de detección y aviso se configurarán más adelante, ya que por normativa, sus medidas y su disposición vienen determinados por los tiempos de respuesta de todo el sistema de seguridad.

<sup>1</sup> **Stand by:** modo de desconexión del láser para ahorrar consumo de energía. Normalmente utilizado en aplicaciones móviles, vehículos autónomos, que no se desplacen durante algún tiempo.

## 6.5. Dispositivos de lógica y tratamiento de señales (SRP/CS<sub>b</sub>)

En la gran mayoría de aplicaciones industriales, los componentes encargados del control y monitorización de los diferentes dispositivos de protección (SRP/CS<sub>b</sub>), son los relés de seguridad y los PLC de seguridad. Todos ellos, además de llevar las estructuras internas duplicadas, están diseñados para cumplir con los diferentes MTTF<sub>D</sub> comentados, y dotan a los sistemas con el hardware y software necesarios para poder llevar a cabo las funciones de diagnóstico relacionadas con la DCavg. La diferencia entre ambos, reside en que el relé de seguridad únicamente monitorea e informa sobre el estado de los dispositivos de protección, mientras que el PLC de seguridad, monitorea y gestiona las peticiones de los dispositivos y pone en marcha las funciones de seguridad de la celda. En otras palabras, el PLC de seguridad integra en un componente las funciones de un relé de seguridad y de un PLC, dotando así al sistema con la capacidad de control y gestión de dispositivos de protección y actuadores de la celda, como por ejemplo: robots, cilindros neumáticos, cintas, etc.

En la práctica, esto significa que un sistema compuesto solo por relés de seguridad no tiene la capacidad de controlar y poner en marcha funciones de seguridad, o sí, pero muy limitadamente. Es por ello, que se ha de dotar el sistema con un PLC externo que se encargue del control y puesta en marcha de las funciones. Visto esto, se puede decir que a efectos prácticos este sistema realizaría las mismas funciones que uno formado solamente por un PLC de seguridad. La elección de una composición u otra viene determinada por el número de dispositivos de protección que se tengan, ya que en sistemas realizados con relés de seguridad debe haber uno por cada dispositivo de protección que haya. Con lo cual, para sistemas con muchos dispositivos de protección se optará por la instalación de un PLC de seguridad, mientras que si la cantidad de dispositivos es menor, se instalarán los respectivos relés de seguridad y el PLC de control. Todo esto, responde al precio de los componentes y al cableado que suponen, ya que la instalación de cada relé de seguridad supone su coste de adquisición y su respectivo cableado. No obstante, para sistemas de seguridad pequeños, el coste de los relés y del PLC estándar sigue siendo menor que el de un PLC de seguridad. Este sería el caso de la celda del laboratorio, donde solo harán falta dos dispositivos de protección, uno por cada zona de acceso. Por ello, el sistema seleccionado para la celda será el compuesto por los relés de seguridad y el PLC de propósito general.

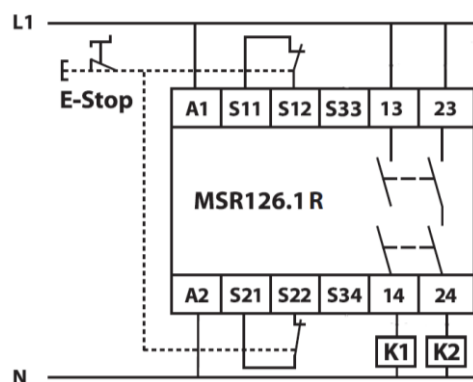


Figura 6.13. Estructura del sistema de seguridad de la celda

### 6.5.1. Relés de seguridad

Con tal de cumplir con las normativas establecidas, el funcionamiento de los relés de seguridad se basa en la redundancia y en el autocontrol. Por un lado, la redundancia consiste en la duplicidad de la estructura interna del relé, circuito de activación y contactos, y tiene como finalidad disminuir la probabilidad de fallo del mismo. Por otro lado, el autocontrol ofrece la posibilidad de controlar y supervisar la posición de todos los componentes del relé, uniendo con guías forzosas<sup>1</sup> los contactos normalmente abiertos (NA) del relé con contactos normalmente cerrados (NC). Según el tipo de dispositivo de protección que monitoricen, se pueden distinguir entre dos tipos diferentes, y es que algunos dispositivos entregan tensión según su estado (p. ej. cortinas fotoeléctricas) y otros actúan como simples interruptores de seguridad (equipos sensibles a la presión).

En cuanto a los primeros, su funcionamiento se basa en la activación de dos relés a través de dos circuitos de entrada, los cuales tienen como función controlar los relés e impedir su activación en caso de fallo interno del circuito. Mientras que los segundos, disponen de dos circuitos de control con una entrada y una salida, que permiten crear un circuito cerrado con los interruptores de los dispositivos de seguridad (*figura 6.14.*), con el objetivo de verificar el estado del cableado y de los dispositivos. Para ello, este tipo de relés envían señales activas a través de la salida del circuito de control y las reciben y verifican en la entrada, y es que, si hubiera algún tipo de problema en el cableado o algún dispositivo se hubiera activado, la señal enviada no sería la misma que la recibida.



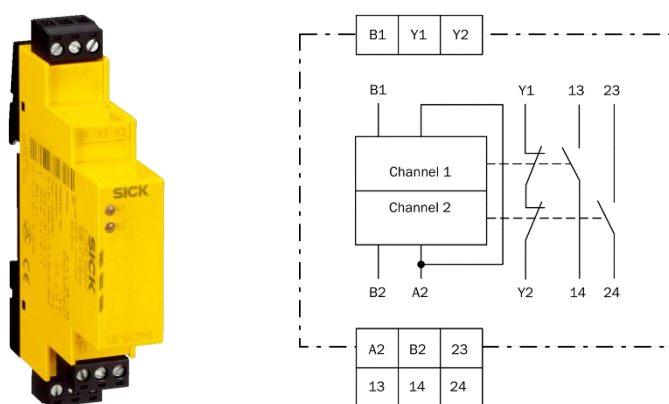
**Figura 6.14.** Ejemplo de conexión con circuitos cerrado para el relé MSR126R/T de Allen-Bradley (Fuente [7])

En cambio, los primeros se basan en las señales enviadas desde las salidas de seguridad (OSSD) de los dispositivos para así verificar el cableado y su estado, ya que si hubiera algún tipo de problema en el

<sup>1</sup> **Guía forzosa:** unión mecánica de contactos que hace que los contactos NC y NA de un relé no puedan estar cerrados al mismo tiempo.

cableado la señal no llegaría correctamente al relé, indicando así que se ha de activar una función de seguridad. A todo ello, cabe destacar que hay relés que incluyen otras funcionalidades, como por ejemplo la sustitución de los contactos mecánicos por circuitos electrónicos, o la incorporación de terminales para reestablecer el relé manualmente. En todo caso, estas funciones son extras y no afectan al funcionamiento básico del relé ni a sus especificaciones de seguridad.

Respecto a los relés seleccionados para el sistema de seguridad de la celda, serán dos relés UE10-2FG2D0 de la marca Sick, los cuales están preparados para monitorizar equipos optoelectrónicos con salidas OSSD, como pueden ser escáneres láser o cortinas fotoeléctricas. Asimismo, son aptos para su uso en sistemas con exigencia de categoría de estructura 4 y PL=e, lo que está por encima de las especificaciones exigidas.



**Figura 6.15.** Relé Sick UE10-2FG2D0 y esquema de sus circuitos internos y bornes de conexión (Fuente [1-10])

Tal y como se puede ver en el esquema eléctrico, este modelo se corresponde con el primer tipo de relé, ya que dispone de dos relés internos activados por sus respectivos circuitos de entrada o canales de seguridad (B1, B2). Por otro lado, los bornes Y1 e Y2 son los encargados de la monitorización del estado de los contactos (EDM), y su conexión es obligatoria si se quiere conseguir la máxima categoría de estructura y PL que ofrece el relé. Por ello, y con el objetivo de verificar el funcionamiento del relé y de su estado, en el sistema de seguridad de la celda estos contactos son los que irán conectados al PLC externo. Por último, los contactos 13-14 y 23-24 son los relativos a seguridad, y normalmente se utilizan para conectar los dispositivos de salida (SRP/CS<sub>c</sub>) del sistema. Éstos, además de permitir tensiones y corrientes más altas que los dedicados al EDM, están diseñados para realizar conmutaciones seguras gracias a sus contactos normalmente abiertos. Como se explicó anteriormente, los equipos de protección envían una señal de 0V cuando han detectado una situación peligrosa, lo que hace que los relés no se activen y por lo tanto los contactos NA corten la corriente.

Como apunte final, decir que este modelo tiene un tiempo medio de uso de 20 años y que está preparado para trabajar con una tensión de 24 Vdc y unos amperajes máximos de 50 mA para las

entradas de activación B1 y B2, de 300 mA para los contactos Y1-Y2, y de 6 A para los contactos de seguridad.

### 6.5.2. PLC de propósito general: Siemens Simatic S7-1200

De distinta forma que para los otros elementos del sistema, el PLC de propósito general no está obligado a cumplir con ninguna de las normativas, y es que al tratarse de un dispositivo sin clasificación de seguridad, no se le pueden exigir el hardware y software necesarios para poder cumplir con los requisitos pertinentes. Tal y como marca la norma UNE-ISO 13849-1:2016, la instalación de este tipo de PLC en un sistema de seguridad con especificaciones de categoría de estructura 3 y PL=d, solo está sujeta a que se utilicen complementariamente otros componentes de seguridad, como por ejemplo, los relés vistos en el apartado anterior. Considerando todo ello, el PLC a escoger para gestionar las peticiones de las funciones de seguridad de la celda, deberá cumplir únicamente con los requisitos de entradas y salidas necesarias para su conexión con el sistema de seguridad y con el robot.

Teniendo en cuenta que el PLC monitorizará el estado de los relés y del robot, y que deberá ser capaz de iniciar y parar el movimiento del mismo, se necesitarán un mínimo de 6 entradas y 6 salidas. Toda su justificación y utilidad se podrá ver en el siguiente capítulo, en el cual se trata la integración del sistema de seguridad en el robot. Una vez dicho esto, el PLC escogido para el sistema de seguridad de la celda será un PLC Simatic S7-1200 de Siemens, más concretamente el módulo central (CPU) 1212C con número de referencia 6ES7212-1AE40-0XB0.



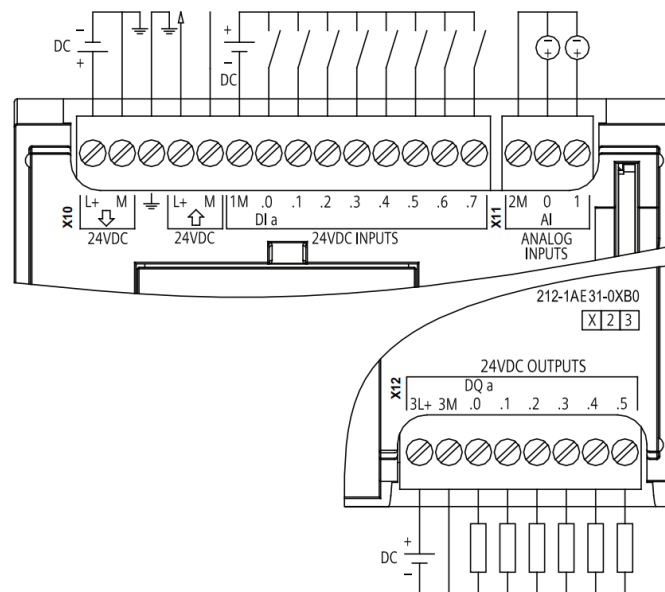
**Figura 6.16.** CPU del PLC Simatic S7-1200 1212C 6ES7212-1AE40-0XB0 (Fuente [8])

Este modelo dispone de 8 entradas digitales, 6 salidas digitales y 2 entradas analógicas, lo cual cumple con las E/S mínimas exigidas, además incorpora un puerto Ethernet por si en un futuro se quisiera diseñar otro tipo de comunicación con el robot. Otro de los motivos por el cual se ha seleccionado este PLC, es su uso en otras asignaturas de la escuela, permitiendo así que cualquier alumno del laboratorio pueda entender la programación del PLC e incluso modificarla llegado el caso. Asimismo, este modelo



ofrece un conjunto de posibilidades suficientes para su integración en un sistema como el de la celda a diseñar, ofreciendo una capacidad para guardado de datos y programación de 75 kB. Por último, sus características eléctricas son: alimentación del módulo a 24 Vdc y consumo de 400 mA; entradas digitales con valores máximos de 24 Vdc y 1 mA; y salidas digitales de 24 Vdc y 0,5 A. Las entradas analógicas no se han considerado debido a que la totalidad de señales del sistema serán digitales, y por lo tanto no se emplearán en ningún momento.

Referente a su cableado, se hará siguiendo el esquemático mostrado en el manual de sistema del PLC, el cual se adjunta a continuación:



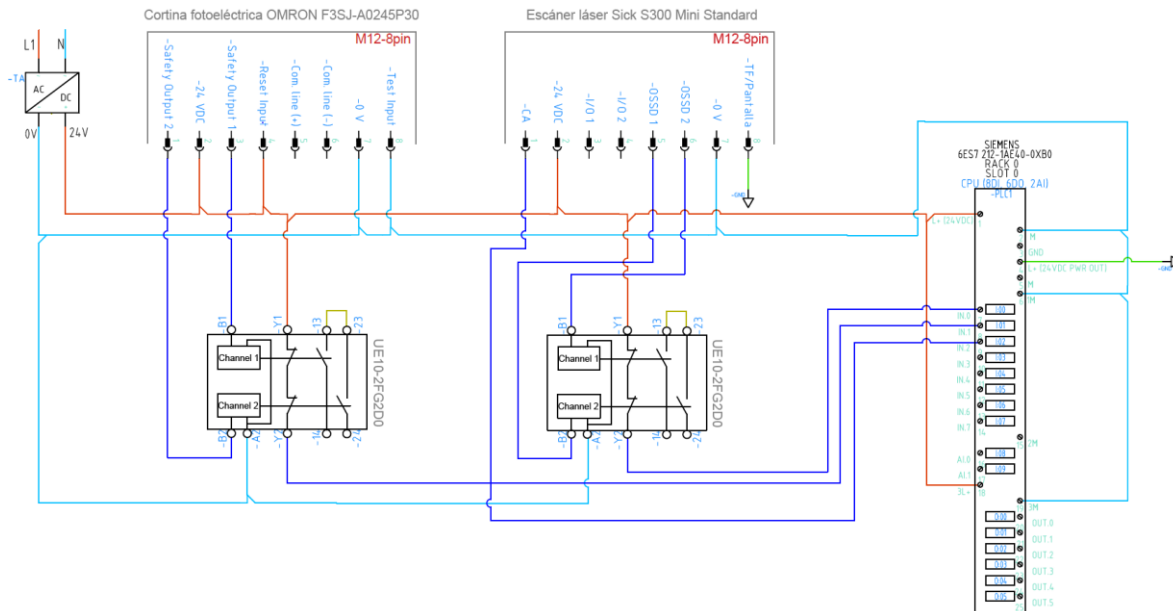
**Figura 6.17.** Diagrama de cableado de la CPU 1212C 6ES7212-1AE40-0XB0 y asignación de bornes  
(Fuente [1-3]. Tabla A-42 (pág. 763))

Como se puede observar, todos los bornes marcados con L+ se corresponden a la alimentación positiva del módulo (24 Vdc), mientras que los marcados con M, son los de la alimentación negativa (0 V). Respecto a las entradas y salidas, los interruptores de las entradas significan elementos que se activan y que envían señal al PLC, y las cargas de las salidas, elementos que se activan cuando hay una señal saliente.

## 6.6. Conexión de las partes del sistema SRP/CS<sub>a</sub> y SRP/CS<sub>b</sub>

Antes de integrar el sistema de control de seguridad en el robot, hay que establecer cómo será el conexionado entre los equipos de protección sensible y los dispositivos de lógica y tratamiento de señales. Todo ello, con el objetivo de asegurar que las señales que irán a los dispositivos de salida

(SRP/CS<sub>c</sub>) serán las correctas y responderán a las peticiones de seguridad de los dispositivos. El conexionado, deberá seguir el esquema de redundancia presentado en la *figura 6.8.* y las especificaciones de conexión de los dispositivos explicadas hasta ahora, resultando así en un esquema, que será el que después habrá que integrar en el sistema robótico según las funcionalidades que se quieran tener.



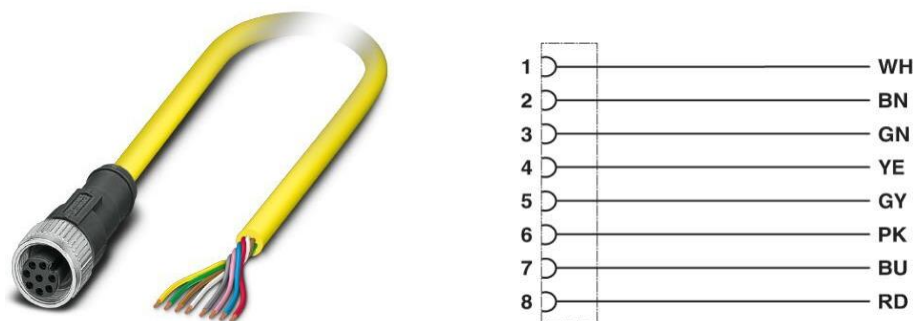
**Figura 6.18.** Conexionado de los equipos de protección sensible con los relés de seguridad y el PLC

De acuerdo a la arquitectura redundante, las dos salidas de seguridad (OSSD) de los equipos de protección sensible se llevan a los dos canales de entrada de sus respectivos relés. En los relés de seguridad, se conecta el borne Y1 a la tensión de 24Vdc y el Y2 a una entrada del PLC, con el fin de informar al PLC de su estado. Por otro lado, los contactos de seguridad 13 y 23 se interconectan para así poder cumplir con el principio de redundancia, haciendo que la señal que se conecte a los dispositivos de salida (obtenida de los contactos 14-24) tenga en cuenta los dos canales, tal y como se podrá ver en el siguiente capítulo. Finalmente, se lleva la señal del estado del campo de aviso del escáner (CA) al PLC, para así poder ser gestionada y activar algún tipo de señalización lumínica.

En relación a la funcionalidad del sistema, los equipos de protección mandan una señal activa (24 Vdc) cuando su estado es seguro. Ésta, activa los relés de los canales 1 y 2 del relé de seguridad, y hace que los contactos encargados de la monitorización se abran y los de seguridad se cierren. Esto provoca que al PLC no le llegue ninguna señal, indicando así que no hay ninguna emergencia; pero que a los dispositivos de salida sí, indicándoles que pueden estar activos. En caso de que los equipos detectarán a alguien en la zona de peligro, las salidas de seguridad se desactivarían (0 V), provocando así la

desactivación de los relés. En consecuencia, el PLC recibiría una señal indicando la activación de uno de los equipos, a la vez que la señal enviada a los dispositivos de salida se desactivaría.

Por último, hay que tener en cuenta que para la conexión de los equipos de protección sensible se utilizará un cable con terminación hembra M12-8 pin en un extremo y sin ninguna terminación en el otro. Este tipo de cables, comúnmente llamados latiguillos, son ampliamente utilizados en la sensórica de las instalaciones automáticas, y sirven para la conexión de los sensores con el resto del sistema. De la misma forma que con los perfiles de aluminio, los fabricantes y modelos de este tipo de cables son infinitos, y es que este tipo de conexionado es estándar y universal. Por ello, y a modo de ejemplo, se muestra el modelo 1406104 del fabricante Phoenix Contact, aunque en el montaje final de la celda se podría utilizar éste o cualquier otro.



**Figura 6.19.** Cable para sensores 1406104 de Phoenix Contact y asignación de pines por color (Fuente [1-4])

## 7. Integración del sistema de seguridad en el robot

Una vez determinado cómo será el sistema de seguridad de la celda y que partes lo compondrán, hay que determinar cómo será su integración en el sistema robótico de la celda. Por ello, en este capítulo, se tratan las funcionalidades que debe tener el sistema de seguridad, su conexionado con los actuadores o dispositivos de salida, las funcionalidades del PLC, y finalmente, la disposición de los equipos de protección sensible en los accesos de la celda. Todo esto, se deberá hacer teniendo en cuenta las diferentes normativas explicadas hasta el momento y respetando los requisitos expuestos en el apartado 6.1, sobre todo en lo que a accesos se refiere. Por lo tanto, este capítulo no deja de ser una continuación del anterior, en el que al final, ya se presentará un diseño definido de la celda y su sistema de seguridad.

### 7.1. Funcionalidades del sistema de seguridad

Las funciones de seguridad del sistema marcan el comportamiento que debe tener el sistema robótico en condiciones de emergencia, o cuando alguno de los elementos de protección se ha activado. Por ello, la determinación de éstas es fundamental para establecer cómo será el conexionado entre el sistema de seguridad y el robot (SRP/CS<sub>c</sub>), y es que, dependiendo de las funciones que se quieran tener, la conexión se realizará mediante las E/S de seguridad o las E/S dedicadas del robot. Asimismo, permitirá establecer el papel y programación del PLC en la activación o desactivación de las mismas. Su implementación, viene determinada por la norma UNE-ISO 10218-2:2011, donde se indican que funciones de seguridad deben tener las celdas robotizadas.

#### 7.1.1. Funciones de seguridad según la norma UNE-ISO 10218-2:2011

De acuerdo con la norma UNE-ISO 10218-2:2011, cada celda robotizada o sistema robótico debe tener una función de parada de emergencia y una función de parada de seguridad. Las dos, deben parar todos los movimientos del robot y cesar cualquier función peligrosa controlada por el sistema robótico, con la diferencia, que la primera tiene que ser iniciada manualmente, y la segunda, manualmente o por lógica de control. Otra de las diferencias importantes, es que en un sistema robótico solo puede haber una única función de parada de emergencia, mientras que puede tener una o más funciones de paro de seguridad, según los equipos de protección que haya. Conforme a la norma IEC 60204-1, las paradas producidas por estas funciones de seguridad se pueden clasificar en tres categorías, distinguiendo entre:

- **Categoría 0:** parada incontrolada producida por el corte inmediato de la energía de los actuadores.

- **Categoría 1:** parada controlada manteniendo disponible la energía en los actuadores hasta la parada del robot. Justo después de la parada, la energía se corta.
- **Categoría 2:** parada controlada manteniendo disponible la energía en los actuadores.

A continuación, se adjunta una tabla comparativa entre las funciones de paro de emergencia y de seguridad, donde además se indica que categoría de parada puede iniciar cada una.

Comparativa entre los paros de emergencia y de seguridad		
	Paro de emergencia	Paro de seguridad
Inicio	Manual	Manual o automático
Reanudación	Únicamente manual	Manual o automático
Frecuencia de uso	Poco frecuente	Variable, dependiendo de la aplicación
Propósito	Emergencia	Precaución o reducción de riesgo
Efecto	Quitar la energía de los peligros	Control de seguridad de los peligros
Tipos de paro	Categorías 0 y 1 (según evaluación de riesgos)	Categorías 0, 1 y 2 (según evaluación de riesgos)

**Tabla 7.1.** Comparativa entre los comportamientos de un paro de emergencia y uno de seguridad  
(Fuente [1]. Tabla 1 (pág. 16))

### 7.1.2. Funciones de seguridad para la celda del laboratorio

Según se ha visto, la celda a diseñar deberá tener una función de paro de emergencia y dos de paro de seguridad, ya que el sistema diseñado incorpora dos equipos de protección sensible. En relación a la primera, será la ejecutada por los pulsadores de emergencia instalados en la teach pendant y en el frontal del controlador del robot, considerando que al ser una celda con dimensiones reducidas el alcance de cualquiera de los dos será viable en una situación de emergencia. Al activar uno de estos dos pulsadores, el controlador del robot ejecuta una para de categoría 0, cortando así la tensión de alimentación de los servomotores y activando sus frenos. Por otro lado, si se quisiera reanudar el movimiento del robot, se deberían rearmar los pulsadores accionados y activar la alimentación de los servomotores a través del botón SVO ON del controlador. Como se puede ver, todo ello cumple con los requisitos establecidos por la norma para este tipo de función de seguridad, y es que al estar todo ejecutado por el controlador del robot, ya está diseñado para cumplir con las normativas correspondientes.

En segundo lugar, se encuentran las dos funciones de paro de seguridad, las cuales se activan mediante las señales de petición de los equipos de protección sensible. Éstas son un poco más especiales, ya que hay que analizar los requerimientos de cada acceso, para así establecer que función de paro tendrá

cada equipo de protección y que categoría de parada deberá ejecutar. Por una parte, el acceso lateral se utilizará para introducir o extraer piezas de la cinta y/o los cubiletes, lo que significa, que este acceso se utilizará muy frecuentemente debido a que el robot opera con dichas piezas. Por lo tanto, y con tal de no estar activando y desactivando los servomotores cada vez que se introduce o retira una pieza, la cortina fotoeléctrica deberá activar un paro de categoría 2, que pare los movimientos del robot cuando alguien traspase la cortina, y vuelva a iniciar los movimientos automáticamente cuando el espacio haya quedado liberado. Por otra parte, el acceso frontal servirá para entrar dentro del espacio de seguridad y hacer tareas dentro de la celda, como modificar el sistema que hay o programar puntos del robot. Con lo cual, la protección de este acceso deberá permitir en ciertas situaciones controladas el acceso libre al espacio de seguridad, mientras que si el robot opera normalmente, deberá activar la parada correspondiente. Teniendo en cuenta que este acceso solo se utilizará en unas determinadas ocasiones, y que la intrusión en él en condiciones no seguras puede resultar más peligroso, el escáner láser deberá activar una parada de categoría 1.

Considerando todo ello, la función de parada de seguridad activada por la cortina fotoeléctrica se deberá implementar a través de las E/S dedicadas al paro y a la puesta en marcha del robot. Mientras que la función activada por el escáner láser, se llevará a cabo a través de las E/S de seguridad del robot, y más concretamente de los terminales correspondientes a la función de interruptor de la puerta (*door switch*). Esto se ha decidido así dadas las condiciones expuestas sobre el acceso controlado, y es que, recordando del apartado 4.2.3, esta función permite el movimiento del robot en modo teach (manual). Con lo cual, cuando se quiera acceder al espacio de seguridad para realizar cualquier operación habrá que seleccionar el modo teach en el controlador. En caso contrario, se activará una parada de categoría 1, que parará el robot y que obligará a un reinicio manual a través de los botones RESET y SVO ON del controlador, para volverlo a poner en marcha.

## 7.2. Conexionado del sistema de seguridad con el robot

Siguiendo con el esquema mostrado en la *figura 6.18.*, ahora se han de interconectar los contactos de seguridad de los relés de seguridad y las salidas del PLC a las E/S del controlador del robot. Para ello, hay que tener en cuenta que el PLC de propósito general no está preparado para detectar sus posibles fallos (diagnóstico o autocontrol), y que en caso de error, éste podría actuar como un simple retardo hacia una situación peligrosa. Por esta razón, se deben proporcionar las medidas necesarias para que las funciones de seguridad que pone en marcha el PLC se puedan poner en marcha aunque éste falle. Además, ha de monitorizar el estado de los relés y de los actuadores para verificar que todo está funcionando correctamente, y si no poner en marcha las funciones de seguridad adecuadas. Todo ello, se ha de hacer siguiendo los principios de redundancia vistos hasta ahora, que indican que las señales que controlan los dispositivos de salida han de estar accionadas por dos señales redundantes.

### 7.2.1. Conexionado de la cortina fotoeléctrica. E/S dedicadas

Como ya se ha visto, la activación de la función de parada de seguridad de la cortina se hará mediante las E/S dedicadas del controlador, y su comportamiento será el de parar el robot cuando alguien haya traspasado la cortina e iniciarlo cuando no se detecte a nadie. Por tanto, una de las primeras cosas a hacer es mirar las diferentes funciones que ofrecen las E/S dedicadas, para así poder seleccionar y configurar las que más se adapten a las necesidades del sistema. En este caso, se deberán buscar funciones que permitan la parada y el inicio del robot y la monitorización de su estado, para así poder poner en marcha la parada de categoría 2 y poder verificar su funcionamiento a través del PLC. Dicho esto, las funciones escogidas para la parada de seguridad de la cortina, serán:

Funciones de las E/S dedicadas para el paro de seguridad			
Nombre	E/S	Función	Activación
STOP2	Entrada	Detiene el programa o programas que se estén ejecutando	Nivel <sup>1</sup>
STOP2	Salida	Indica si el programa está en pausa o detenido	Nivel
START	Entrada	Inicia el programa detenido	Nivel
IOENA	Entrada	Solicita los derechos de operación para el control de señal externo	Flanco <sup>2</sup>

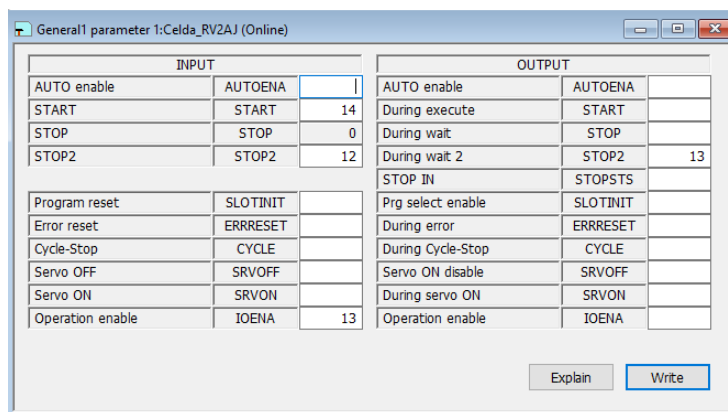
**Tabla 7.2.** Funciones de las E/S dedicadas a configurar para el paro de seguridad  
(Fuente [1-1]. Tabla 3-2 (pág. 3-45))

Una de las primeras cosas a destacar, es que para llevar a cabo la detención del robot se pueden utilizar las funciones STOP y STOP2, la diferencia es que mientras la primera está fijada en la entrada 0 y no se puede cambiar, la segunda puede ser configurada en cualquier entrada. Por otro lado, la función IOENA es la encargada de solicitar los derechos de operación, y solo se utiliza en casos donde intervienen funciones que pueden poner en marcha el robot. Esto es debido a que solo puede haber un dispositivo que opere el controlador, por ejemplo, si están conectados un PLC, un ordenador y la teach pendant, solo uno de los tres dispositivos tendrá permiso (derechos de operación) para enviar comandos y ejecutar programas del controlador. En el caso de las E/S dedicadas (PLC), sus funciones serán válidas cuando el modo de operación del controlador sea AUTO (externo) y la señal IOENA se haya activado, en caso de no activarse, los derechos de operación los tendría el ordenador externo. Todo ello, no afecta a las funciones de las E/S dedicadas al paro del robot, ya que al tratarse de funciones que pueden ser usadas por motivos de seguridad, no requieren de derechos de operación.

<sup>1</sup> **Activación por nivel:** la función se valida cuando la señal está en ON (24V), y se invalida cuando está en OFF (0V).

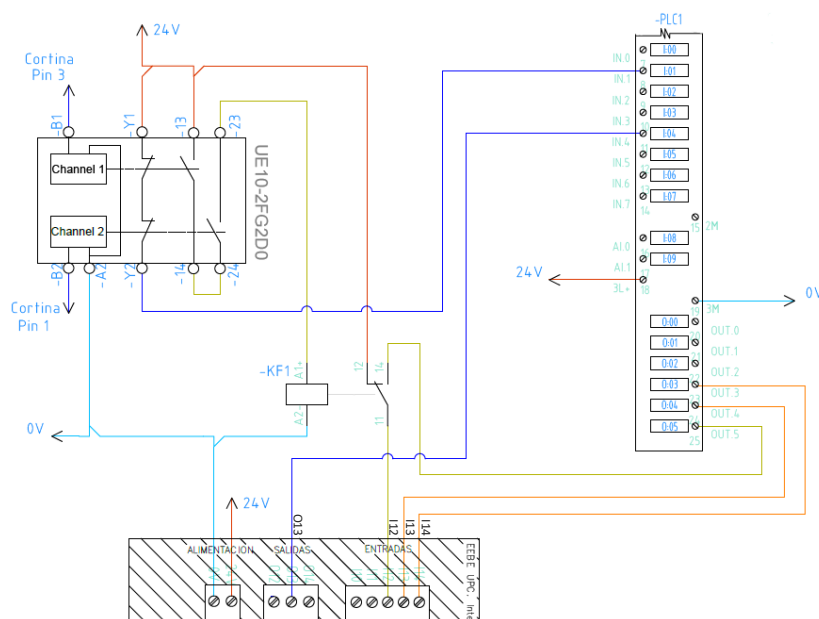
<sup>2</sup> **Activación por flanco:** la función designada se valida cuando la señal cambia de ON a OFF, y se mantiene validada incluso cuando la señal pasa a OFF.

Después de haber determinado las funciones que se usarán, hay que establecer a que entradas o salidas de la placa PCB irán conectadas las señales correspondientes, para así poder configurar los parámetros de las funciones en el software RT ToolBox2. Por un lado, y teniendo en cuenta que a la placa también irán conectados los elementos del sistema de trabajo adjunto del robot, las señales de las funciones STOP2, IOENA y START, irán conectadas a las entradas marcadas como I12, I13 e I14, dejando así para los sensores la I10 e I11. Por otro lado, la señal de la función de monitorización STOP2 irá conectada a la salida O13, dejando la O12 para el motor. Una vez determinado esto, y considerando que los números de E/S marcadas en la placa son iguales que los de las E/S externas del robot, ya se puede pasar a configurar los parámetros de E/S dedicadas del controlador.



**Figura 7.1.** Configuración de las E/S dedicadas para la celda en el software RT ToolBox2

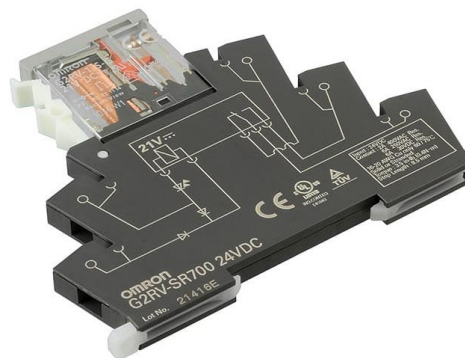
Sabiendo cómo han de ir conectadas las E/S dedicadas, y que el conexionado ha de seguir con el principio de redundancia, la conexión entre el relé de seguridad de la cortina, el PLC y la PCB será:



**Figura 7.2.** Conexionado del relé de la cortina con el PLC y las E/S externas del robot



Con tal de cumplir con el principio de redundancia, y con el objetivo de evitar posibles fallos derivados de un mal funcionamiento del PLC, se conecta la señal de activación de la parada del robot (I14) a un relé con un contacto NC, conectado a 24V dc, y con un contacto NA, conectado a la salida DQ 0.5 del PLC. Esto permite que en caso de emergencia, haya dos elementos que activen la función de parada del robot, ya que por un lado el PLC activaría la salida DQ 0.5, y por el otro, el relé se desactivaría y conectaría el terminal NC. Por lo tanto, en caso de que el relé se hubiera quedado enclavado en alguna de las dos posiciones, la parada de seguridad se activaría mediante el PLC o mediante el terminal conectado a 24 Vdc, que en cuyo caso provocaría una parada indefinida hasta que no se cambiará el relé. Por otro lado, si el PLC tuviera un mal funcionamiento, la parada de seguridad se activaría por medio de la desactivación del relé y conmutación del contacto NC. El relé seleccionado para el conexionado, será el relé sin enclavamiento OMRON G2RV-SR700 DC24, que incorpora conexiones con bornes roscados y se activa con 24 Vdc. Además, en sus contactos permite el paso de hasta 6 A a una tensión de 30 Vdc, lo cual está por encima de las necesidades requeridas para las E/S externas del robot.



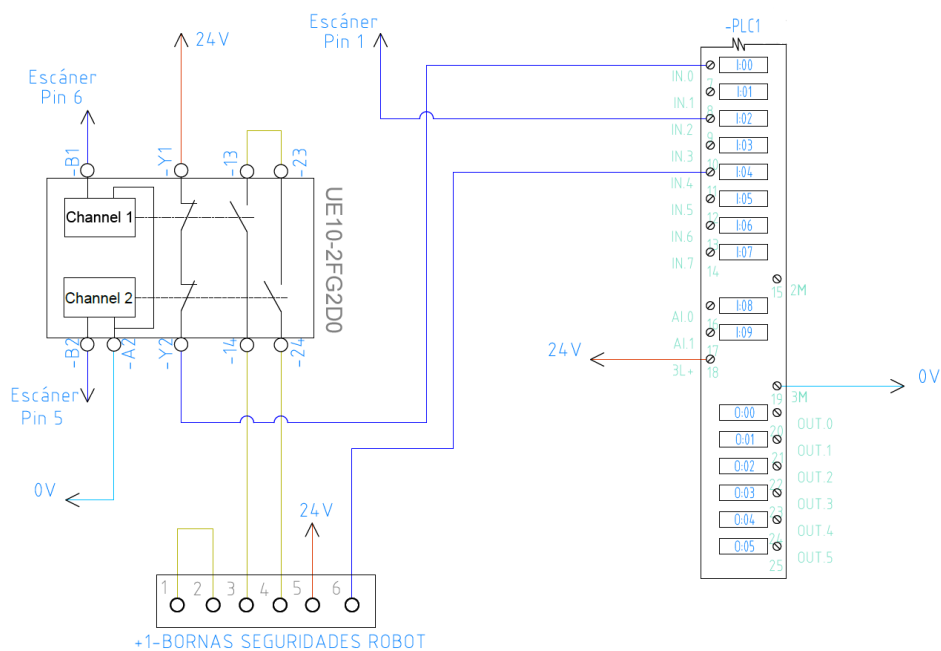
**Figura 7.3.** Relé sin enclavamiento OMRON modelo G2RV-SR700 DC24 (Fuente [9])

Respecto a la monitorización del relé de seguridad y del estado del robot, se conecta el terminal Y2 del relé de seguridad a la entrada DI 0.1 del PLC y la salida dedicada (O13) a la entrada DI 0.4. Con estas dos señales, se permitirá que el programa del relé haga una verificación de si coincide la petición de seguridad de la cortina con el estado del robot, para si no, activar la salida DQ 0.5 y poner en marcha la función de seguridad. Finalmente, las salidas DQ 0.3 y DQ 0.4 del PLC son las que van conectadas a las entradas correspondientes a las funciones IOENA (I13) y START (I14), y son las que se activarán para volver a poner en marcha el robot una vez se detecte que la cortina fotoeléctrica no está activa.

### 7.2.2. Conexionado del escáner láser. E/S de seguridad

La segunda función de parada de seguridad de la celda, correspondiente al escáner láser, se implementará a través de la función *door switch* de las E/S de seguridad del controlador del robot. Esto quiere decir, que de cara al conexionado no se tendrán que considerar tantas cosas como en el anterior

caso, ya que al ser una función ofrecida por el propio controlador del robot, ya incorpora los medios necesarios para cumplir con la redundancia y monitorizar el estado del robot. Según el manual de especificaciones del robot, y así como se pudo ver en el apartado 4.2.3, el conexionado de estas funciones se hace mediante un circuito cerrado con los interruptores de los dispositivos de seguridad, y su activación, se basa en interrupción del mismo. En otras palabras, la función de parada se activará cuando alguno de los interruptores se abra. Por todo ello, los bornes de seguridad correspondientes al circuito de activación de la función *door switch*, se conectarán directamente a los contactos del relé de seguridad que monitoriza el estado del escáner. En la siguiente figura, se puede observar cómo quedará el conexionado para la función de seguridad del escáner.



**Figura 7.4.** Conexionado del relé del escáner con el PLC y las E/S de seguridad del robot

En el esquema además de poder observar lo dicho sobre los bornes de activación de la función *door switch* (4-5), se puede ver como los bornes correspondientes a la parada de emergencia (1-2) se dejan cortocircuitados. Esto se debe a que al no instalar más pulsadores de emergencia, se ha de dejar el circuito de activación cerrado para indicar al controlador que no hay ninguna petición de parada de emergencia externa. Por otra parte, los bornes de información o monitorización del estado del robot (5-6) se conectan a 24 Vdc y a la entrada DI 0.4 del PLC, para así llevar los 24 Vdc a la entrada del PLC en caso que se activara alguna de las funciones de seguridad. Esta señal, igual que pasaba en el caso anterior, servirá para verificar si coincide la petición de seguridad de la cortina, conectada en la entrada DI 0.0 del PLC, con el estado del robot. Por último, también se puede ver como la señal del campo de aviso de escáner (Escáner-Pin1) va conectada a la entrada DI 0.2 del PLC.

### 7.3. Otras conexiones del sistema y alimentación

Hay otros elementos de la celda, que por su funcionalidad o por cómo están conectados, no se pueden considerar dispositivos de salida (SRP/CS<sub>c</sub>) del sistema de seguridad. Es el caso del indicador lumínico del estado de la celda y de los elementos del sistema de trabajo adjunto del robot. Por una parte, el indicador no tiene una función predominante en lo que a seguridad se refiere, y solo actúa como una simple señalización de cómo está la celda en un determinado momento. Por la otra, los sensores y el motor de la cinta del sistema de trabajo, al estar conectados y accionados por el controlador del robot, solamente deben incorporar mecanismos que aseguren su parada en caso de activación de una función de seguridad. Todo ello, hace que el conexionado de estos elementos no deba cumplir con una norma específica, y que por lo tanto, queden un poco al margen de la estructura y diseño que se ha estado viendo hasta ahora.

#### 7.3.1. Señalización lumínica del estado de la celda

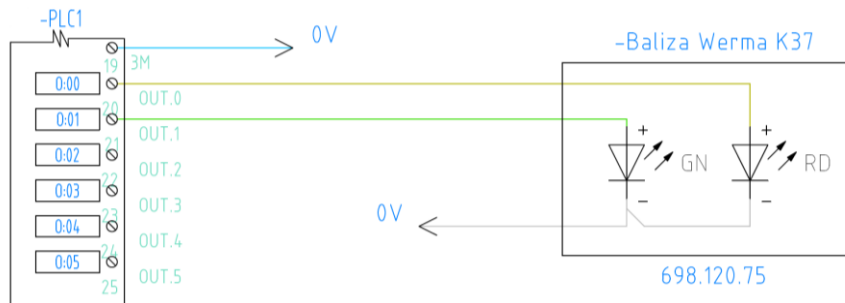
Uno de los requisitos de diseño de la celda, era que debida disponer de algún indicador para señalar el estado de la misma. Teniendo en cuenta las diferentes funcionalidades de la celda, esto se traduce en algún tipo de indicador que señale si el robot está operando correctamente, o está en condiciones de hacerlo, o si ha habido una emergencia y ha tenido que parar. Por ello, se ha buscado una columna compacta de señalización (baliza) con dos señales luminosas, una verde y otra roja, y eléctricamente compatible con el PLC. El modelo finalmente escogido, es una baliza de la serie Kompakt 37 número 69812075 del fabricante Werma, que se alimenta a 24 Vdc e incorpora dos leds de colores verde y rojo. Además, también se deberá comprar su respectivo soporte para su montaje sobre la perfilera de aluminio de la celda.



**Figura 7.5.** Columna compacta de señalización y soporte para la celda (Fuente [1-5])

Aunque en la figura no se pueda apreciar, el conexionado de la baliza se hace mediante un cable de 3 hilos de 2 m de largo, donde cada hilo está señalizado con un color diferente según su función. El blanco, sirve para conectar la tensión común (0 V) de toda la baliza; mientras que el verde y el amarillo,

serven para activar los leds verde y rojo, respectivamente. Dicho esto, la conexión de la baliza con el PLC se llevará a cabo mediante las salidas DQ 0.0 y DQ 0.1, donde irán conectados los cables verde y amarillo para así activar los leds correspondientes (*figura 7.6.*). Esta conexión, puede ser directa debido a que el consumo de intensidad de la baliza, 100 mA, es inferior a la proporcionada por las salidas del PLC, 500 mA.



**Figura 7.6.** Conexionado de la baliza de señalización con el PLC

### 7.3.2. Conexión de los elementos del sistema de trabajo adjunto

En cuanto a los elementos del sistema de trabajo adjunto, su conexión se hace mediante las entradas externas de la placa PCB o a las salidas del PLC, dependiendo de si son sensores o actuadores. Esto es debido a que cuando alguna de las funciones de seguridad se activa, el controlador solo detiene el programa o programas que se estén ejecutando en ese preciso momento, y no, las salidas que estén activas. Por lo tanto, si se conectaran los actuadores directamente a las salidas del robot, no se estaría asegurando su parada en caso de emergencia. Por ello, la salida del robot que controla el accionamiento del motor de la cinta se deberá llevar al PLC, y será éste quien decida si se activa o no dependiendo del estado de los relés de seguridad y del robot. Con lo cual, la única cosa a considerar en la conexión de los sensores y el motor, serán las especificaciones eléctricas de las entradas del robot y las salidas del PLC.

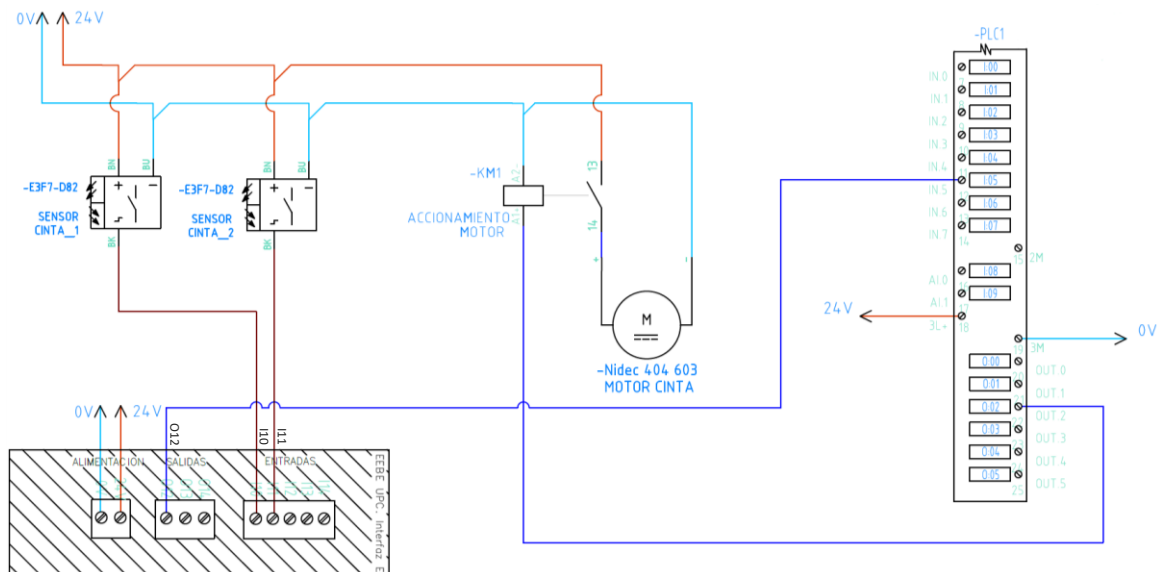
En primer lugar, los sensores Omron E3FZ-D82 dan como máximo una tensión de 30 Vdc y una corriente de 100 mA, lo cual está por encima de los requerimientos de las entradas del robot, que son iguales a 26,4 Vdc y 7 mA. Esto significa que la salida de los sensores se podrá conectar directamente a las entradas del robot, ya que los valores del sensor son los máximos que podría llegar a dar. En segundo lugar, el motor Nidec 404 603 requiere de una tensión de 24 Vdc y una corriente de 2 A para poder funcionar, lo cual está muy por encima de lo que pueden ofrecer las salidas del PLC, que como máximo dan una tensión de 24 Vdc y una corriente de 0,5 A. Así pues, el accionamiento del motor se deberá hacer a través de un relé con un contacto NA conectado a los 24 Vdc de la fuente de alimentación, y activado por una de las salidas del PLC. Asimismo, los contactos del relé deberán soportar una corriente mínima de 2 A, para así asegurar que la alimentación del motor es la correcta.

Considerando estas características, el relé seleccionado para el accionamiento del motor será el relé sin enclavamiento RIF-0-RPT-24DC-2903361 del fabricante Phoenix Contact, que soporta una corriente máxima de 6 A en sus contactos y se activa con 24 Vdc.



**Figura 7.7.** Relé sin enclavamiento RIF-0-RPT-24DC-2903361 de Phoenix Contact (Fuente [10])

Como ya se comentó anteriormente, las entradas I10 e I11 son las que se utilizarán para conectar los sensores, mientras que la salida O12 será la utilizada para el accionamiento del motor. En vista de ello, y según lo especificado para la conexión de los sensores y actuadores, la conexión de los elementos del sistema de trabajo del robot, quedará de la siguiente forma:



**Figura 7.8.** Conexión de los sensores y el motor de la celda a las E/S del robot (PCB) y al PLC

Tal y como se puede ver, la conexión de los sensores se hace directamente a las entradas del robot, mientras que la salida O12, correspondiente al motor, se lleva a la entrada DI 0.5 del PLC para que éste lo accione a través del relé conectado a la salida DQ 0.2.

### 7.3.3. Fuente de alimentación del sistema

En todos los esquemas de conexionado vistos hasta ahora, aparecen unas flechas referenciando las conexiones de alimentación (0 V y 24 V) de los esquemas. Esta metodología, tiene el objetivo de reducir la cantidad de cableado en los esquemas, y simplemente significa que en esos cables o bornes irán conectadas las tensiones proporcionadas por una fuente de alimentación que alimentará todo el sistema. Por lo que, lo siguiente a hacer es seleccionar una fuente de alimentación que sea capaz de suministrar la tensión y corriente que demanda el sistema. A continuación, se muestra una tabla en la que se recogen todos los valores de tensión y corriente de los dispositivos, con el fin de encontrar la corriente total a suministrar.

Tensiones y corrientes de los dispositivos del sistema		
Dispositivo o equipo de protección	Tensión nominal	Intensidad nominal
Sensores Omron E3FZ-D82 (x2)	24Vdc	25 mA
Motor Nidec 404 603	24Vdc	2 A
Cortina fotoeléctrica Omron F3SJ-A0245P30	24Vdc	144 mA
Escáner láser Sick S300 Mini	24Vdc	255 mA
PLC Siemens S7-1200	24Vdc	400 mA
Alimentación salidas PLC	24Vdc	130 mA
Alimentación salidas robot	24Vdc	60 mA
<b>Corriente consumida total</b>	-	<b>3,039 A</b>

**Tabla 7.3.** Tensiones y corrientes consumidas por los diferentes dispositivos del sistema  
(Fuente: Hojas de especificaciones y manuales de los dispositivos)

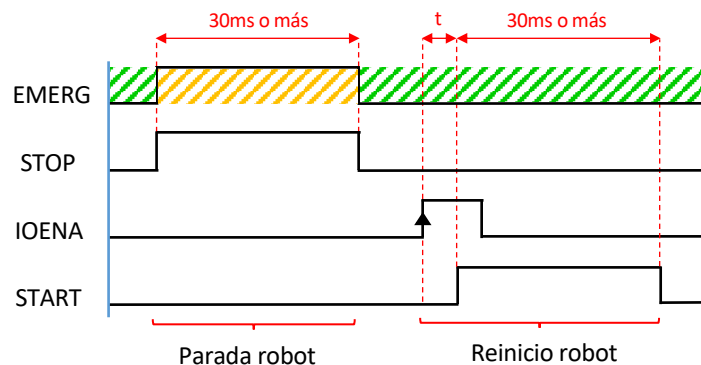
Vistos los resultados, la fuente de alimentación del sistema deberá proporcionar una tensión de 24 Vdc y una corriente mínima de 3,039 A. Dadas las condiciones de uso de la celda, uso educativo, y que debido a ello el sistema siempre estará sujeto a posibles cambios y conexiones de nuevos dispositivos, se ha decidido buscar una fuente de alimentación que proporcionara un total de 5 A, para así evitar tener que cambiar la fuente de alimentación en un futuro. Por ello, la fuente de alimentación seleccionada será la EDR-120-24 del fabricante Mean Well, que es capaz de proporcionar una tensión de 24 Vdc y una corriente de 5 A (120 W).



**Figura 7.9.** Fuente de alimentación EDR-120-24 (120 W) de Mean Well (Fuente [1-6])

## 7.4. Funcionalidades y programación del PLC

Tal y como se ha podido ir viendo a lo largo de este capítulo, las funcionalidades a ejecutar por el PLC se centran en la monitorización de los relés y del estado del robot; la puesta en marcha de la parada de seguridad de la cortina y el posterior reinicio del movimiento; la activación de la baliza de señalización según el estado del robot; y finalmente, el accionamiento del motor de la cinta. Para la programación del PLC, además de tener en cuenta todas estas funcionalidades, también hay que tener presentes los requisitos de activación de las E/S dedicadas y el comportamiento que tendrá el sistema en caso de que las dos funciones de parada de emergencia se soliciten a la vez. En cuanto a los primeros, el manual de instrucciones del controlador indica que las señales encargadas de la parada del robot (STOP) y del inicio de los movimientos (START), han de estar activas como mínimo 30 ms para poder ser validadas por el controlador. Asimismo, la señal encargada de solicitar los derechos de operación (IOENA) ha de activarse antes que la de inicio de movimiento (START), y ha de mantenerse activa hasta que esta última se haya activado. En la siguiente figura, se puede observar la secuencia que deberán seguir las señales con tal de ejecutar la parada e inicio de los movimientos del robot.



**Figura 7.10.** Secuencia de las señales de las E/S dedicadas para una situación de emergencia cualquiera

En referencia al comportamiento, hay que establecer cuál de las dos paradas de seguridad tendrá más prioridad, para así evitar entrar en un conflicto en caso de que las dos se activen a la vez. Para ello, hay que tener en cuenta que según el diseño del conexionado, el PLC no tiene capacidad de actuación sobre la parada de seguridad ejecutada por el escáner, y que además, esta última lleva al sistema a una parada de categoría mayor que no la activada por la cortina. Considerando esto, se puede determinar que la parada de seguridad del escáner tendrá prioridad sobre la de la cortina, y que por lo tanto, si en cualquier momento se activa la petición de parada de seguridad del escáner, el sistema la ejecutará. En caso de que se cambie el modo de operación del robot a manual, las peticiones del escáner y la cortina no tendrán ningún efecto, ya que por un lado, las E/S de seguridad permiten el movimiento manual del robot, y por el otro, las E/S dedicadas quedan deshabilitadas.

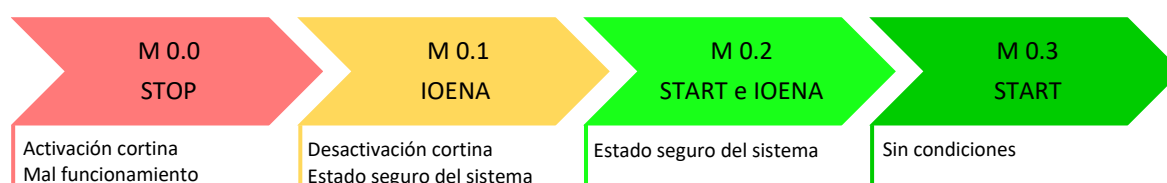
### 7.4.1. Programación del PLC

La programación del PLC se ha hecho mediante el lenguaje de programación estándar ladder, más conocido como diagrama de contactos, el cual se basa en la simbología de los contactos eléctricos y es compatible con el software de programación *Tia Portal* de los PLC Siemens. En vista de las funcionalidades que ha de tener el PLC, la programación se ha estructurado en dos partes, una primera donde se trata toda la secuencia de parada y reinicio de los movimientos del robot, y una segunda en la que se gestiona la activación de los leds de la baliza y el accionamiento del motor. Respecto a la monitorización de los relés y el PLC, se trata también en la primera parte, ya que si los funcionamientos no fueran los correctos se ejecutaría la secuencia de parada dicha. Antes de pasar a la programación, hay que identificar a que señales se corresponden cada entrada y salida del PLC (*tabla 7.4.*), de acuerdo con el conexionado.

Asignación de entradas y salidas del PLC			
Entrada	Señal	Salida	Señal
DI 0.0	Monitorización escáner	DQ 0.0	Activación luz roja baliza
DI 0.1	Monitorización cortina	DQ 0.1	Activación luz verde baliza
DI 0.2	CA - campo aviso escáner	DQ 0.2	Accionamiento del motor
DI 0.3	Estado del robot (parada escáner)	DQ 0.3	Activación función START
DI 0.4	Estado del robot (parada cortina)	DQ 0.4	Activación función IOENA
DI 0.5	Accionamiento del motor (robot)	DQ.0.5	Activación función STOP

**Tabla 7.4.** Asignación de las E/S del PLC con las señales del sistema

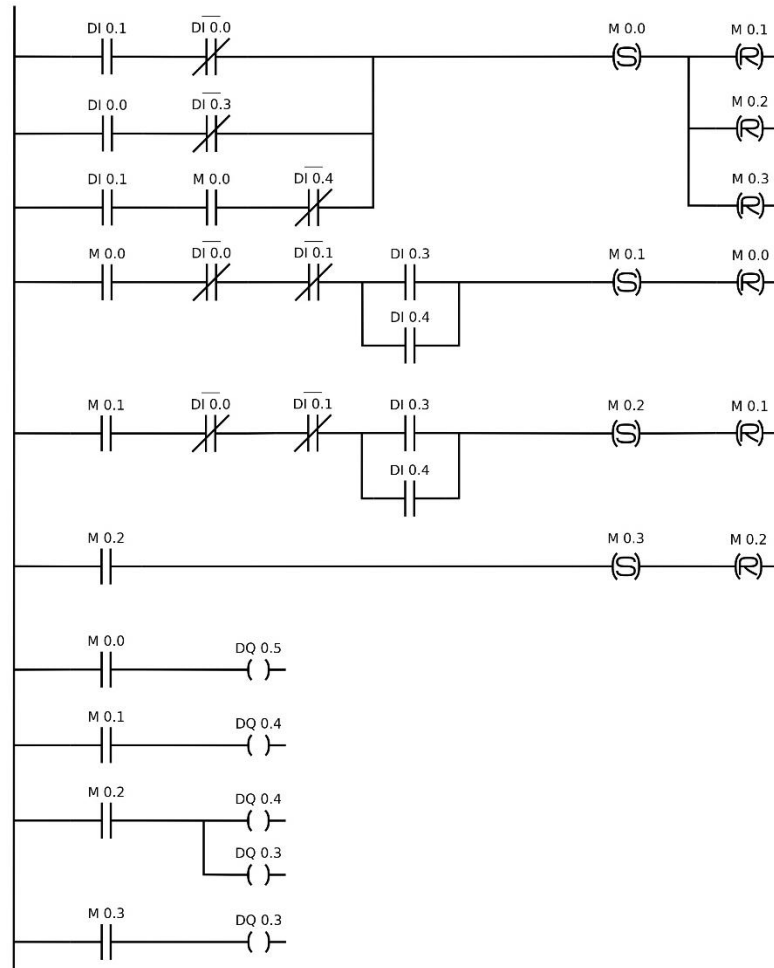
Para llevar a cabo la secuencia de parada e inicio del robot, se han de establecer unas marcas en el programa que permitan seguir los pasos de secuencia y activar o desactivar las señales según convenga. Estas marcas, son variables internas del PLC que se pueden ir activando o desactivando (*SET* o *RESET*) según se vaya avanzando en la secuencia del programa, y que sirven para marcar el orden de ejecución del mismo o los pasos. Por ejemplo, en el caso de la secuencia a programar, habrá cuatro marcas con unas condiciones de paso determinadas por el estado en que se encuentre el robot y los dispositivos de protección. En el siguiente diagrama, se pueden ver las marcas y las señales a activar en cada paso, así como sus condiciones de transición:



**Figura 7.11.** Diagrama del paso de secuencia para la parada e inicio de los movimientos del robot



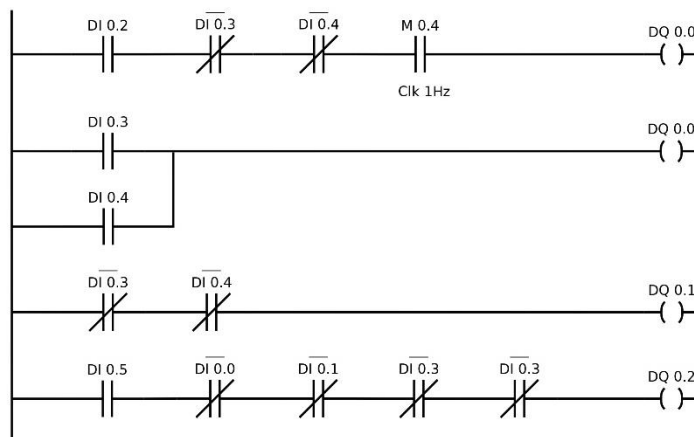
A fin de detectar malos funcionamientos, se comparará el estado de los relés con el del robot, y si no coinciden, se ejecutará la secuencia de parada del robot. Por otro lado, y relacionado con la prioridad de las paradas, si llega una petición de parada de la cortina y se detecta que el escáner está activado, no se ejecutará la secuencia de parada. Con todo ello, la secuencia programada, será:



**Figura 7.12.** Programación de la secuencia de parada e inicio de movimientos en ladder para el PLC

En relación a la activación de los leds de la baliza, habrá que comprobar el estado del robot para determinar si encender el led verde o el rojo. En caso de que las señales de entrada correspondientes al estado del robot estén activas, se deberá encender el led rojo, ya que el robot se encontrará parado. En cambio, si no está activa ninguna de estas señales querrá decir que el robot está operando correctamente, y que por lo tanto, se deberá encender el led verde. Por último, si la señal del estado del campo de aviso del escáner (CA) está activa y las que indican que el robot está parado no, se deberá hacer parpadear el led rojo. Para ello, se configurará una nueva marca independiente que se active y desactive a una frecuencia de 1 Hz, y que permita efectuar la intermitencia de la luz. Estas marcas, se pueden configurar en el software de programación de los PLC Siemens como bits de marca de ciclo, y

sirven para crear señales que cambian de un estado bajo (0) a uno alto (1) periódicamente. Referente al accionamiento del motor de la cinta, solo se deberá activar cuando el robot lo solicite y cuando se cumplan las condiciones de seguridad, iguales a no haber ningún relé de seguridad activado y no estar el robot parado. Con lo cual, el motor se activará cuando la señal del robot esté activada y las de monitorización desactivadas. En la siguiente figura, se puede observar la programación hecha para la parte correspondiente a la activación de la baliza y del motor.



**Figura 7.13.** Programación de la activación de los leds de la baliza y del motor en ladder para el PLC

## 7.5. Disposición y configuración de los equipos de protección sensible

Como se ha ido diciendo a lo largo de todo el trabajo, la disposición de los equipos de protección sensible en la celda, viene determinada por los tiempos de respuesta de todos los elementos que componen el sistema de seguridad (SRP/CS<sub>a,b,c</sub>). Una vez determinado todo el sistema y su conexionado, ya se puede pasar a analizar la distancia que debe haber entre las zonas de detección y el espacio restringido de la celda, según marque la norma UNE-ISO 10218-2:2011. De la misma forma, también se podrá establecer cómo será la configuración del campo de detección y del campo de aviso del escáner láser. Todo ello, unido al vallado perimetral dispuesto en las zonas no accesibles, conformará la protección perimetral de la celda y permitirá presentar el diseño 3D de todo el conjunto.

### 7.5.1. Requisitos a cumplir según la norma UNE-ISO 10218-2:2011

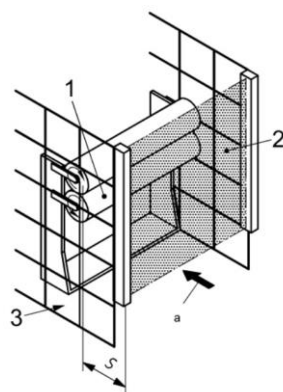
Teniendo en cuenta que estos dispositivos se utilizarán para iniciar un paro de seguridad del sistema robótico y/o para evitar el inicio del mismo, se deberán seguir las indicaciones de los apartados 5.10.5.2 y 5.10.5.3 de la norma, que en términos generales indican que estos dispositivos deben estar instalados de forma segura y deben detectar a una persona o parte de ella a lo largo de la zona de detección o zona de acceso. Por otro lado, se remarca que todas estas protecciones tienen que estar dispuestas a una distancia suficiente de la zona de peligro, para así asegurar que se elimina el peligro antes de que

ninguna parte de la persona alcance el mismo. Para ello, se han de usar las fórmulas de la norma UNE-ISO 13855:2011 considerando el tiempo de respuesta del sistema y una velocidad de aproximación de la persona,  $K$ , mínima de 1600 mm/s.

Por último, la norma también indica que en los accesos protegidos por estos dispositivos, también se pueden implementar otro tipo de medidas de seguridad, como vallado, para así reducir los accesos al mínimo necesario o para evitar que se rodeen o sobrepasen las zonas de detección. En todo caso, estas medidas vendrán definidas por la correspondiente evaluación de riesgos.

### 7.5.2. Disposición de la cortina fotoeléctrica

Respecto a la instalación de la cortina fotoeléctrica, se dispondrá cada terminal en un extremo del acceso lateral, haciendo así que se prolongue la zona de detección a lo largo de todo el lateral de la celda. Asimismo, se instalarán a una distancia de la zona restringida igual a la determinada por la norma UNE-ISO 13855:2011, que en su apartado 6.2 marca los cálculos a seguir para los ESPE con zonas de detección perpendiculares a la dirección de aproximación de las personas. A continuación, se muestra la fórmula y los parámetros a considerar para dispositivos con capacidades de detección  $\leq 40$  mm, que sería el caso de la cortina fotoeléctrica.



$$S = (K \times T) + C \quad (\text{Ec. 7.1})$$

- |     |                           |     |                                 |
|-----|---------------------------|-----|---------------------------------|
| 1   | Zona peligrosa            | $K$ | Velocidad de aproximación       |
| 2   | Zona de detección         | $T$ | Tiempo de respuesta del sistema |
| 3   | Resguardo fijo            | $C$ | Distancia de intrusión          |
| $S$ | Distancia mínima          |     |                                 |
| $a$ | Dirección de aproximación |     |                                 |

**Figura 7.14.** Disposición de los ESPE con zonas de detección perpendiculares a la dirección de aproximación  
(Fuente [15]. Figura 3 y ecuación 2 (págs. 17-18))

Atendiendo a la ecuación 7.1, la norma indica que mientras la distancia mínima calculada sea menor de 500 mm, la velocidad de aproximación se debe considerar de 2000 mm/s y la distancia de intrusión igual a  $8(d - 14)$ , donde  $d$  es la capacidad de detección del dispositivo. Por otro lado, si se quiere reiniciar el movimiento del robot una vez que el dispositivo no detecte, la distancia mínima calculada deberá ser superior a 150 mm. Con lo cual, la fórmula a aplicar para el cálculo de la distancia de la cortina fotoeléctrica será:

$$S = (2000 \times T) + 8(d - 14); \quad \forall 150 < S < 500 \quad (\text{Ec. 7.2})$$

Ahora hay que determinar cuál será el tiempo de respuesta del sistema conforme al diseño del conexionado visto. Para ello, hay que analizar los caminos y dispositivos que recorrerá la petición de parada de seguridad desde que la envíe la cortina fotoeléctrica hasta que llegue a las E/S del robot. En este caso, hay dos caminos diferentes, dependiendo del estado del relé OMRON que lleva la petición a la entrada dedicada del robot. Si el relé estuviera conmutado en el contacto NC, la petición pasaría por la cortina fotoeléctrica, el relé de seguridad, el relé OMRON y la entrada del robot. Mientras que si estuviera conmutado el contacto NA, iría por la cortina fotoeléctrica, el relé de seguridad, el PLC y la entrada del robot. Considerando los tiempos de respuesta mostrados en las hojas de especificaciones de cada dispositivo, y un valor promedio de tiempo de respuesta<sup>1</sup> del PLC igual a 40 ms, los tiempos resultantes serán:

Tiempos de respuesta o conmutación de los dispositivos del sistema		
Dispositivo o equipo de protección	Tiempos opción 1	Tiempos opción 2
Cortina fotoeléctrica Omron F3SJ-A0245P30	10 ms	10 ms
Relé de seguridad Sick UE10-2FG2D0	10 ms	10 ms
Relé OMRON G2RV-SR700 DC24	20 ms	-
PLC Siemens S7-1200	-	40 ms
Entradas del robot	10 ms	10 ms
<b>Tiempo de respuesta total</b>	<b>50 ms</b>	<b>60 ms</b>

**Tabla 7.5.** Tabla de comparación entre los tiempos de respuesta del sistema

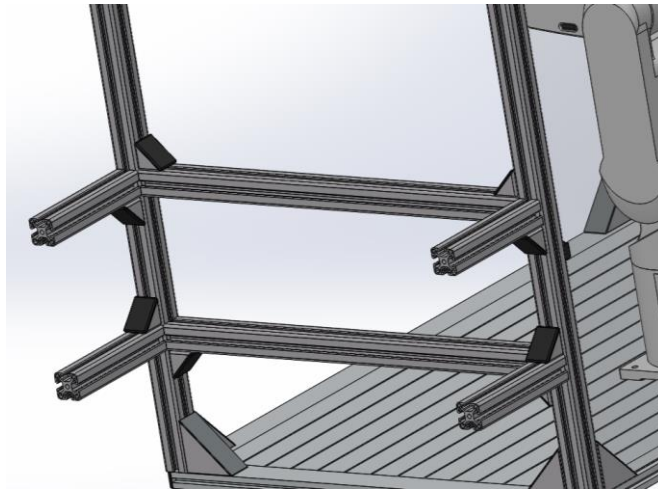
(Fuente: Hojas de especificaciones y manuales de los dispositivos)

Una vez determinados los tiempos de respuesta del sistema, se aplica la ecuación 7.2 con el tiempo de respuesta más alto y con una capacidad de detección de 30 mm, correspondiente a la de la cortina fotoeléctrica. Esto, da como resultado una distancia mínima entre el espacio restringido de la celda y la cortina de 248 mm, lo que significa, que la cortina fotoeléctrica deberá estar instalada a 198 mm del borde de la mesa, ya que el espacio restringido se encuentra a 50 mm del borde. Por otra parte, y pensando en un acceso ergonómico a la celda, se ha decidido que la cortina se dispondrá a una altura de 200 mm desde la superficie de la mesa. Todo ello, resulta en que la cortina no se pueda instalar en

<sup>1</sup> **Tiempo de respuesta del PLC:** para poder calcular exactamente el tiempo de respuesta, se debería disponer del PLC y el software de programación. Por ello, se ha estimado un valor promedio considerando la poca carga de cálculo del programa, y que la actualización de las salidas del PLC estará comprendida entre 1 o 2 tiempos de ciclo de 20 ms.

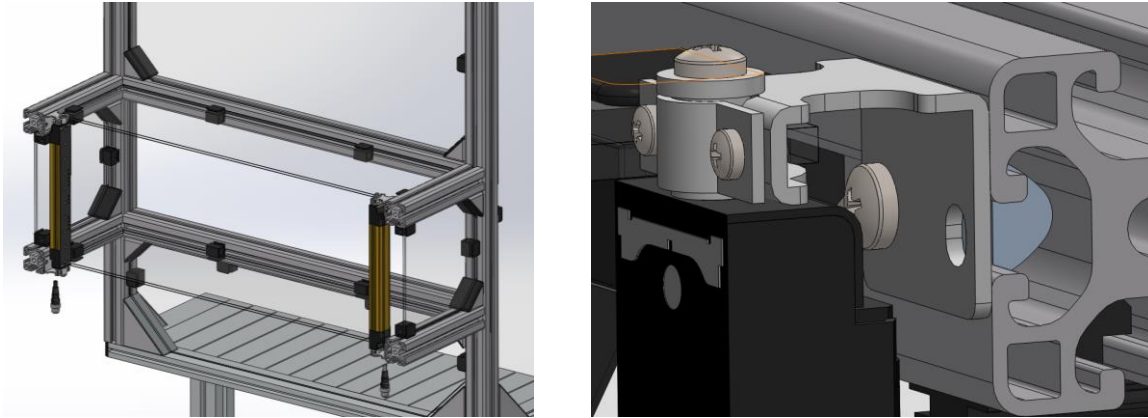
el mismo plano que los perfiles del vallado perimetral, y que por lo tanto, se tenga que diseñar una estructura a parte para así disponer la cortina en su ubicación y proteger las zonas del lateral que queden desprotegidas.

La estructura se compondrá de cuatro perfiles de aluminio de 40x40 mm y de 213 mm de longitud, que se instalarán perpendiculares a los perfiles del vallado perimetral, y que servirán para sujetar la cortina fotoeléctrica y los paneles de policarbonato que protegerán el saliente creado por la misma. Además, se dispondrán dos perfiles de 680 mm de longitud a lo largo del lateral, que ayudarán a fijar los paneles de protección del resto del acceso y a delimitar aún más el espacio accesible. Para sujetar toda esta estructura, se utilizarán 8 escuadra de 40x40 mm, que permitirán la unión de los perfiles en 90º mediante tornillos de M8x18 mm y sus respectivas tuercas cajeadas.



**Figura 7.15.** Diseño 3D de la estructura anexa para la cortina fotoeléctrica en Solidworks

Con el objetivo de fijar la cortina fotoeléctrica a los cuatro perfiles de aluminio, se utilizará el soporte de montaje F39-LJ8 de OMRON y cuatro tornillos de M5x12 mm con sus tuercas cajeadas. Esto se ha decidido así, dadas las características del soporte de montaje, y es que permite ahorrar el máximo espacio posible ofreciendo una fijación segura de los elementos protectores. Referente a los paneles de policarbonato, deberán ser de las mismas características determinadas para el vallado de las zonas no accesibles, e irán fijados a los perfiles con las bridas ya vistas. Asimismo, sus dimensiones se adaptarán a las 6 zonas a proteger, obteniendo así un panel de 670x636 mm, a instalar en la zona superior del plano del borde de la mesa; otro de 670x175 mm, para el hueco inferior; dos de 670x173 mm, para las zonas superior e inferior del saliente de la cortina; y otros dos de 184,7x193 mm, para los huecos laterales del mismo.



**Figura 7.16.** Diseño 3D de la estructura acabada y detalle de la fijación de la cortina al perfil de aluminio

De la misma forma que pasaba con el vallado fijo de las zonas no accesibles, hay infinidad de fabricantes dedicados a la construcción de elementos para sistemas modulares, y la estructura presentada se podría hacer con cualquiera de ellos. Aun así, y con tal de seguir con un modelo estándar, los elementos escogidos para el diseño 3D y con los cuales se podría realizar la estructura, se corresponden con la serie 8 del fabricante item Industrietechnik. En este caso, los perfiles y las bridas son los mismos que los vistos para el vallado fijo, y se añaden 8 kits escuadra X8 40x40 (*figura 7.17-1*) y cuatro tuercas cajeadas St M5 cincadas (*figura 7.17-2*).

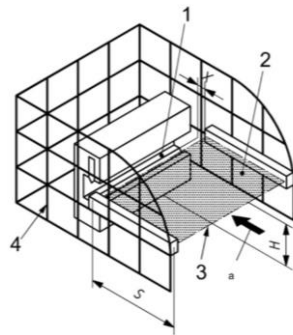


**Figura 7.17.** Elementos del fabricante item Industrietechnik para la estructura de la cortina (Fuente [6])

### 7.5.3. Disposición y configuración del escáner láser

El escáner láser se instalará en el plano frontal de la celda, con el objetivo de crear una zona de detección paralela al suelo que detecte las piernas de las personas que se acerquen al acceso frontal. De la misma forma que para la cortina fotoeléctrica, su disposición y las medidas de su campo de detección configurable vienen determinadas por la norma UNE-ISO 13855:2011, con la diferencia, que en este caso se deberán seguir las pautas del apartado 6.3, el cual indica los cálculos a realizar para

ESPE con zonas de detección paralelas a la dirección de aproximación. Seguidamente, se adjuntan los diagramas y fórmulas que se utilizarán para determinar la instalación del escáner láser.



$$S = (K \times T) + C \quad (\text{Ec. 7.1})$$

$$H = 15(d - 50) \quad (\text{Ec. 7.3})$$

1	Zona peligrosa	H	Altura de la zona de detección
2	Zona de detección	S	Distancia mínima
3	Borde de la zona de detección	X	Distancia zona de detección-máquina
4	Resguardo fijo	a	Dirección de aproximación

**Figura 7.18.** Disposición de los ESPE con zonas de detección paralelas a la dirección de aproximación

(Fuente [15]. Figura 4 y ecuaciones 2 y 8 (pág. 21))

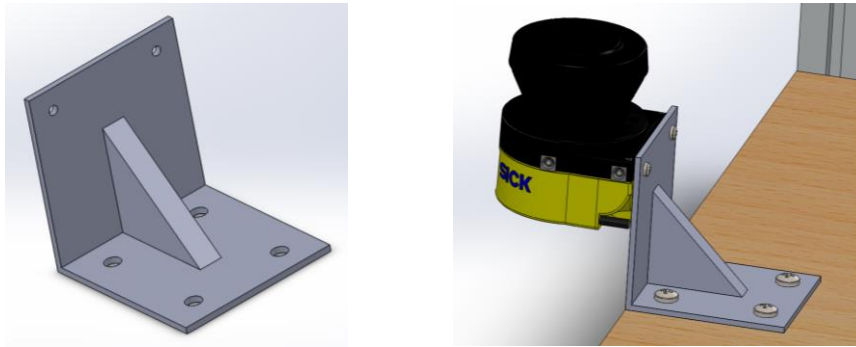
Tal y como se puede ver, la norma referencia otra vez la ecuación 7.1, aunque en este caso marca que los parámetros a considerar han de ser una velocidad de aproximación (K) de 1600 mm/s y una distancia de intrusión (C) igual a  $1200 - 0,4H$ , que no puede ser inferior a 850 mm. Además, indica que la altura de la zona de detección respecto al plano de referencia (H) ha de venir determinada por la ecuación 7.3, y que no puede ser superior a los 1000 mm. Considerando todo ello, la ecuación utilizada para encontrar la distancia mínima del plano de detección será:

$$S = (1600 \times T) + (1200 - 0,4H); \quad \forall H < 1000 \quad (\text{Ec. 7.4})$$

Siguiendo con la misma metodología que para la cortina fotoeléctrica, hay que encontrar los tiempos de respuesta del circuito de activación de la parada de seguridad del escáner. Analizando los conexiones presentados, se puede observar como la petición solo recorre un único camino, que empieza en el escáner láser y pasa por el relé de seguridad hasta llegar a las E/S de seguridad del robot. Con lo cual, teniendo en cuenta los tiempos de respuesta y conmutación mostrados en la *tabla 7.5.*, y que el escáner tiene un tiempo de respuesta de 80 ms, el tiempo total será de 100 ms. En relación al cálculo de la altura, se utilizará la ecuación 7.3 con una capacidad de detección de 70 mm (configurada previamente), obteniendo así un resultado de 300 mm. Ahora sí, con el tiempo de respuesta y la altura del plano de detección se puede aplicar la ecuación 7.4, que da como resultado una distancia mínima de 1240 mm.

Antes de configurar el campo de 1240 mm en el escáner láser, hay que determinar cómo se instalará para así poder cumplir con la altura de 300 mm. Para ello, hay que considerar que el escáner láser incorpora en su parte trasera dos agujeros roscados de M5x8 mm separados por 73 mm, y que en la parte inferior de la mesa hay un tablón a 151 mm del suelo. Sabiendo esto, habrá que mecanizar algún tipo de soporte que incorpore dos agujeros pasantes de M5 y que permita instalar el escáner a la altura

marcada. Como propuesta, se ha diseñado un soporte de dimensiones 110x110 mm y espesor 4 mm, que en una longitud incorpora cuatro agujeros pasantes de M8 para poder ser anclado en la madera, y en la otra los dos agujeros para el escáner. Asimismo, incorpora un nervio en el centro para hacer el soporte más resistente. En la siguiente figura, se puede ver el soporte y su instalación en la celda.

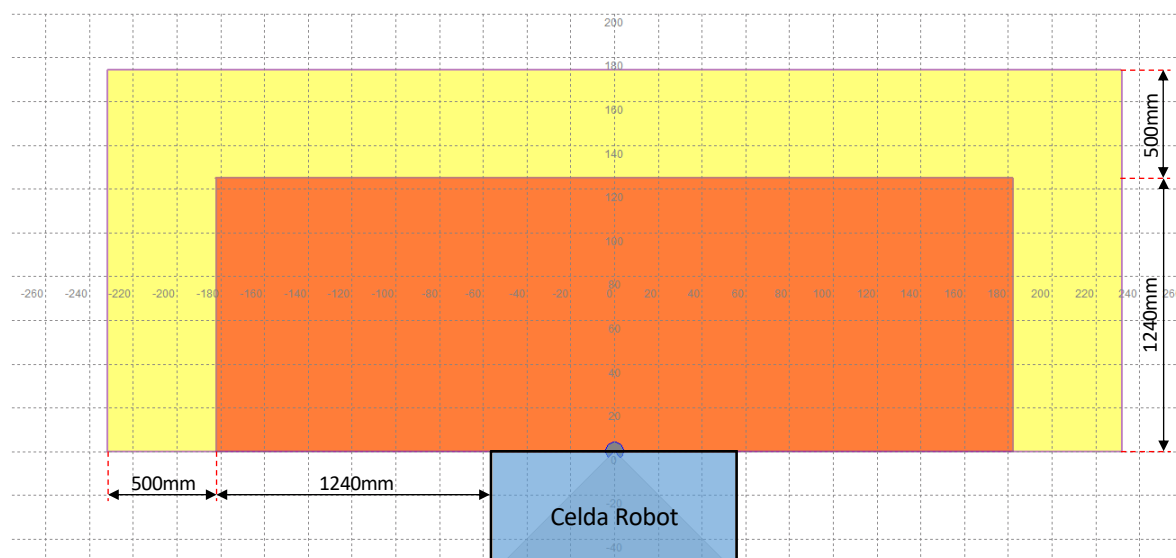


**Figura 7.19.** Diseño 3D del soporte del escáner e instalación final en la celda del laboratorio

Igual que pasaba con los perfiles de aluminio, la instalación del escáner se podría llevar a cabo de distintas formas, siempre y cuando, se respete la altura fijada de 300 mm. De la misma forma, se podría disponer en cualquier lugar a lo largo del plano frontal de la mesa, ya que al poder configurar el tamaño y forma del campo de detección, no hay una ubicación fija. En la celda, se ha decidido instalarlo en la mitad, para así simplificar la configuración de los campos y hacerlos simétricos.

Como ya se comentó, los campos de detección y aviso se configuran mediante el software CDS de Sick, el cual incorpora una herramienta gráfica que permite dibujar los planos mediante puntos o líneas. Esto, facilita mucho su configuración, y hace que únicamente se tengan que considerar las medidas de la celda y del campo. En el caso de la celda a diseñar, esto se traduce en un campo de detección de forma rectangular de 1240x3630 mm, en que la primera dimensión se corresponde a la distancia mínima, y la segunda, a la suma por cada lado de una mitad de la mesa (575 mm) y la distancia mínima. Con respecto al campo de aviso, se configurará a una distancia de 500 mm del campo de detección, con el objetivo de crear un espacio suficiente para avisar a las personas que están cerca de una zona peligrosa, o que si se acercan más, pararan la operación del robot. A continuación, se muestra la configuración de los campos de detección y aviso en la herramienta gráfica del software CDS.





**Figura 7.20.** Configuración de los campos de detección y aviso en el software CDS de Sick



## Conclusiones

Una de las primeras conclusiones que se pueden extraer del trabajo, es que la celda diseñada cumple con todas las normativas aplicables. Cuestión, que en un principio no era muy clara dada las condiciones de uso de la celda y su ubicación dentro del laboratorio. Y es que hay que recordar, que todas las normativas vistas están confeccionada para su aplicación en instalaciones industriales, y aunque contemplan otras opciones, no sería el caso de robots utilizados para docencia e investigación. En relación a la parte más ilustrativa de las normas, además de la correcta disposición de los diferentes dispositivos, se ha conseguido que la celda incorpore las dos funciones de seguridad que debe tener una celda robotizada, y que además, lo haga incluyendo los tres tipos de categoría de paradas. Lo cual, por desconocimiento no se había planteado en un inicio, pero es muy conveniente de cara a una celda de carácter didáctico.

Por otro lado, también se puede concluir que el diseño permite la total compatibilidad entre las prácticas docentes y el sistema de seguridad, haciendo así que en ningún momento se tenga que desconectar o deshabilitar. En un principio, y considerando que no podrían ser compatibles las dos cuestiones, se pensó en un sistema que se pudiera activar o desactivar dependiendo si la celda se fuera a utilizar como demostración de los elementos y funciones de seguridad o como equipo de prácticas. Esto, hubiera provocada el incumplimiento de muchas de las normas, por ello es muy positivo el diseño obtenido y salvo algún protocolo a aplicar, el funcionamiento de las prácticas podrá ser el mismo que ya había.

Aunque no lo parezca, uno de los puntos más importantes del trabajo es el diseño de la interfaz de conexión de E/S del robot, sobre éste se puede decir que tras haber realizado un estudio de las posibilidades de interconexión del robot, se ha logrado obtener un diseño capaz de permitir la conexión directa de las E/S externas. Quizás, el único inconveniente es el número de entradas y salidas dispuestas en la placa, muy menor al ofrecido por el robot, pero que en todo caso tendría fácil solución considerando los aspectos técnicos aplicados en la placa y el *pin layout* del conector.

Por último, y como resultado del estudio llevado a cabo, se ha conseguido dar una explicación detallada de las normas aplicadas en el diseño y sus aspectos principales. Asimismo, se ha podido verificar el cumplimiento de la jerarquía de normas, siguiendo en todo momento la norma aplicada a sistemas robóticos UNE-ISO 10218 (tipo C) y atendiendo a las de tipo B, según se especificara. Con lo cual, se puede constatar que el seguimiento de las normas y su jerarquía no da lugar a pérdida, y se consiguen analizar todos los aspectos y requerimientos de seguridad de este tipo de máquinas.



## Presupuesto y/o Análisis Económico

Para la elaboración del presupuesto económico, se ha dividido el proyecto en tres partes o fases diferentes, correspondientes a la documentación y diseño de la interfaz de conexión con las E/S del robot (placa PCB); a la documentación de normativas y diseño del sistema de seguridad; y a la integración del sistema en el robot del laboratorio. De igual modo, el presupuesto de cada parte se ha desglosado en costes de materiales y componentes, y en costes de ingeniería. Como se podrá ver, en el presupuesto no se ha incluido el coste de los materiales o componentes de los cuales ya se disponía, como por ejemplo la cortina fotoeléctrica o el propio robot de la celda. Por otro parte, todos los costes de portes y/o gastos de envío se han considerado gratuitos.

### Costes de materiales y componentes utilizados

En la siguiente tabla se pueden observar los costes de los diferentes materiales y componentes eléctricos utilizados en el diseño de la celda robotizada, indicando el distribuidor del cual se ha obtenido el precio orientativo (sin incluir el IVA), y el fabricante de cada elemento.

Costes de materiales y componentes de la celda (exc. IVA)						
	Distribuidor	Material/Componente	Fabricante	Cant.	Precio unit.	Precio total
Diseño PCB	Mouser elect.	Conector hembra SCSI	NorComp	1	7,06€	7,06€
	Mouser elect.	Bloque de 5 terminales	CUI Devices	1	1,08€	1,08€
	Mouser elect.	Bloque de 3 terminales	CUI Devices	1	0,86€	0,86€
	Mouser elect.	Bloque de 2 terminles	CUI Devices	1	0,57€	0,57€
	PCBWay	Fabricación placa PCB	PCBWay	1	1€ <sup>1)</sup>	5€
Sistema de seguridad	Mouser elect.	Conector cortina F39-CN5	OMRON	1	136,08€	136,08€
	Digi-Key elect.	Soporte cortina F39-LJ8	OMRON	1	93,4€	93,4€
	RS Amidata	Escáner láser S300 mini	Sick	1	2.457,4€	2.457,4€
	RS Amidata	Relé de seguridad UE10	Sick	2	86,35€	172,7€
	Automation24	PLC Simatic S7-1200	Siemens	1	214,2€	214,2€
	RS Amidata	Relé G2RV-SR700 DC24	OMRON	1	8,39€	8,39€
	RS Amidata	Latiguillo M12-8pin	Phoenix Cont.	2	22,19€	44,38€
Integración del sistema	RS Amidata	Relé RIF-0-RPT-24VDC	Phoenix Cont.	1	6,70€	6,70€
	Werma	Baliza de señalización	Werma	1	82,91€	82,91€
	Werma	Soporte de montaje baliza	Werma	1	13,50€	13,50€
	RS Amidata	Fuente 24VDC 120 W	Mean Well	1	30,55€	30,55€
	Sinerges tec.	Kits escuadra X8 80x80	Item industr.	8	9,63€	77,04€
	Sinerges tec.	Bridas Multiblock 8 PA	Item industr.	30	1,59€	47,7€
	Sinerges tec.	Kits escuadra X8 40x40	Item industr.	8	4,39€	35,12€
	Sinerges tec.	Tuercas cajeadas St M5	Item industr.	8	1,43€	11,44€

Integración del sistema	Sinerges tec.	Polycarbonato 4 mm	Item industr.	1	75,01€ <sup>2)</sup>	225,03€
	Sinerges tec.	Cortes de paneles	Item industr.	6	-	7,38€
	Sinerges tec.	Perfil 8 40x40 213 mm	Item industr.	4	12,17€ <sup>3)</sup>	10,37€
	Sinerges tec.	Perfil 8 40x40 680 mm	Item industr.	2	12,17€ <sup>3)</sup>	16,55€
	Sinerges tec.	Perfil 8 40x40 1100 mm	Item industr.	4	12,17€ <sup>3)</sup>	53,55€
	Sinerges tec.	Corte de los perfiles	Item industr.	10	2,08€	20,8€
	TME	Tornillería diversa	Kraftberg	44	-	28,19€
	-	Soporte para el escáner	-	1	30€ <sup>4)</sup>	30€
	Automation24	Cableado instalación	LAPP Kabel	-	-	50€
<b>TOTAL costes de materiales (exc. IVA)</b>					<b>3.887,95€</b>	

<sup>1)</sup> Precio obtenido por tasación online del fabricante PCBWay, cantidad de producción mínima 5 uds. a 1€

<sup>2)</sup> Precio para plancha de 1x1 m, la plancha de polycarbonato total hará 3x3 m antes del corte.

<sup>3)</sup> Precio por metro (m) para los perfiles de aluminio.

<sup>4)</sup> Estimación del coste de mecanizar un soporte en aluminio con las características mostradas.

**Tabla P1.** Costes de los materiales utilizados en el diseño de la celda robotizada y distribuidores

## Desglose de las horas invertidas y costes de ingeniería.

Con tal de hacer un cálculo preciso de los costes de ingeniería, primeramente se ha estimado el tiempo invertido en cada fase del proyecto, considerando que cada semana dispone de 5 días hábiles con jornadas de trabajo de 8h cada una.

Desglose de horas invertidas en cada fase del proyecto			
Fase del proyecto	Semanas	Horas	Descripción
Diseño PCB	3	120h	Documentación sobre el robot y diseño de la interfaz de conexión de las E/S (placa PCB).
Sistema de seguridad	6	240h	Documentación sobre normativas y robot, y diseño del sistema de seguridad.
Integración del sistema	4	160h	Integración del sistema de seguridad diseñado en el robot y sus elementos de trabajo.

**Tabla P2.** Tiempo en semanas y horas, dedicado a cada fase del diseño de la celda robotizada

Tal y como se puede ver, no se han considerado las horas dedicadas a la redacción de documentación y memoria del proyecto, con lo cual, los costes de ingeniería resultan en los siguientes.

Costes de ingeniería (exc. IVA)	
<b>Horas totales</b>	520h
<b>Coste por hora</b>	23 €/h
<b>TOTAL costes de ingeniería (exc. IVA)</b>	<b>11.960,00€</b>

**Tabla P3.** Cálculo de los costes de ingeniería según las horas dedicadas y una estimación del coste por hora



## Presupuesto total del proyecto

Una vez calculados todos los costes independientemente, para obtener el presupuesto total del proyecto, se suman sus valores resultantes y se le aplica el IVA general del 21%.

Presupuesto total total del proyecto	
<b>Materiales y componentes</b>	3.887,95€
<b>Ingeniería</b>	11.960,00€
<b>Subtotal</b>	15.847,95€
<b>IVA (21%)</b>	3.328,07€
<b>TOTAL</b>	<b>19.176,02€</b>

**Tabla P4.** Cálculo total del presupuesto para el montaje de la celda robotizada diseñada

Como valoración final del presupuesto obtenido, se puede comentar que gran parte está destinado a los costes de ingeniería, mientras que los materiales y componentes representan un 20,27% del mismo. Si a este coste se le restara el precio del escáner láser, el porcentaje disminuiría todavía más, indicando el gran gasto que provocan este tipo de dispositivos en sistemas de seguridad. Todo ello, se corresponde a todas las posibilidades que ofrecen y a las características de seguridad integradas. Por ejemplo, si no se hubiera dispuesto de la cortina fotoeléctrica, hubiera supuesto un gasto añadido de 964,17 € (distribuidor: Mouser elect.). Asimismo, si se hubiera escogido un relé de seguridad con más características, el precio podría haber aumentado hasta aproximadamente 300 €, lo cual certifica el aumento de presupuestos debido a la integración de estos dispositivos.

# Bibliografía

## Normativas y fuentes documentales

- [1] UNE-EN ISO 10218-1:2012. Robots y dispositivos robóticos. Requisitos de seguridad para robots industriales. Parte 1: Robots [en línea]. 2012. Disponible en: <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/une/?c=N0049289>.
- [2] UNE-EN ISO 10218-2:2011 Robots y dispositivos robóticos. Requisitos de seguridad para robots industriales. Parte 2: Sistemas robot e integración [en línea]. 2011. Disponible en: <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/une/?c=N0048668>.
- [3] 50 pin Amphenol female connector @ Pinouts.ru [en línea]. Disponible en: [https://connector.pinouts.ru/50\\_pin\\_Amphenol\\_female/](https://connector.pinouts.ru/50_pin_Amphenol_female/).
- [4] 111-050-213L001 NorComp Inc. | Conectores, interconectores | DigiKey [en línea]. Disponible en: <https://www.digikey.com/product-detail/es/norcomp-inc/111-050-213L001/1050PFA-ND/955153>.
- [5] TB004-508-03BE CUI Devices | Connectors, Interconnects | DigiKey [en línea]. Disponible en: <https://www.digikey.ch/product-detail/en/cui-devices/TB004-508-03BE/102-6180-ND/10064104>.
- [6] Shop | item Industrietechnik GmbH [en línea]. Disponible en: <https://es-product.item24.com/es/>.
- [7] Rockwell Automation. Instrucciones de instalación Minotaur MSR126 R/T [en línea]. 2011. Disponible en: <http://rockwellautomation.com/literature>
- [8] Siemens CPU 1212C - 6ES7212-1AE40-0XB0 | Automation24 [en línea]. Disponible en: <https://www.automation24.es/siemens-cpu-1212c-6es7212-1ae40-0xb0>.
- [9] G2RV-SR700 DC24 Omron Automation and Safety | Relés | DigiKey [en línea]. Disponible en: <https://www.digikey.com/product-detail/es/omron-automation-and-safety/G2RV-SR700-DC24/Z5824-ND/6047251>.
- [10] 2903361 Phoenix Contact | Relés | DigiKey [en línea]. Disponible en: <https://www.digikey.es/product-detail/es/phoenix-contact/2903361/277-10082-ND/4755334>.
- [11] UNE-EN ISO 8373:1998 Robots manipuladores industriales. Vocabulario [en línea]. 1998. Disponible en: <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/une/?c=N0013713>.
- [12] UNE-EN ISO 14120:2016 Seguridad de las máquinas. Resguardos. Requisitos generales para el diseño y construcción de resguardos fijos y móviles [en línea]. 2016. Disponible en: <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/une/?c=N0056446>.



- [13] UNE-EN ISO 13857:2008 Seguridad de las máquinas. Distancias de seguridad para impedir que se alcancen zonas peligrosas con los miembros superiores e inferiores [en línea]. 2008. Disponible en: <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/une/?c=N0042107>.
- [14] UNE-EN ISO 13849-1:2016 Seguridad de las máquinas. Partes de los sistemas de mando relativas a la seguridad. Parte 1: Principios generales para el diseño [en línea]. 2016. Disponible en: <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/une/?c=N0057029>.
- [15] UNE-EN ISO 13855:2011 Seguridad de las máquinas. Posicionamiento de los protectores con respecto a la velocidad de aproximación de partes del cuerpo humano [en línea]. 2011. Disponible en: <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/une/?c=N0048658>.
- [16] IEC 61496-1:2012/COR1:2015 Corrigendum 1 Safety of machinery - Electro-sensitive protective equipment - Part 1: General requirements and tests [en línea]. 2015. Disponible en: <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/iec/?c=22298>.
- [17] IEC 60204-1:2016 Safety of machinery - Electrical equipment of machines - Part 1: General requirements [en línea]. 2016. Disponible en: <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/iec/?c=26037>.
- [18] CE marking | Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs [en línea]. Disponible en: [https://ec.europa.eu/growth/single-market/ce-marking\\_en](https://ec.europa.eu/growth/single-market/ce-marking_en)
- [19] Máquinas transfer, más flexibles de lo que se cree [en línea]. Disponible en: <http://www.metalmecanica.com/temas/Maquinas-transfer,-mas-flexibles-de-lo-que-se-cree+124963>
- [20] Máquinas Transfer Lineales. [en línea]. Disponible en: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/28.pdf>
- [21] De, D. i Mecánica, I. MÓDULO V: OTRAS TECNOLOGÍAS TEMA 21: Sistemas de Fabricación Flexible TECNOLOGÍA MECÁNICA. [en línea]. Disponible en: [http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/1151\\_ca.pdf](http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/1151_ca.pdf)
- [22] Braman, R. Seguridad Robótica [en línea]. Disponible en: <https://www.tuv.com/content-media-files/mexico/pdfs/industrial-services/tuv-rheinland-collaborative-robotics-whitepaper.pdf>
- [23] Directiva 2006/42/CE (R.D. 1644/2008) [en línea]. Disponible en: [http://www.f2i2.net/legislacionseguridadindustrial/Si\\_Ambito.aspx?id\\_am=11051](http://www.f2i2.net/legislacionseguridadindustrial/Si_Ambito.aspx?id_am=11051).
- [24] ISO - ISO/TS 15066:2016 - Robots and robotic devices — Collaborative robots [en línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/62996.html>
- [25] Marcado CE - Wikipedia, la enciclopedia libre [en línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Marcado\\_CE](https://es.wikipedia.org/wiki/Marcado_CE)
- [26] Preguntas y respuestas sobre normas UNE, ISO, EN, armonizadas... | Esto no cumple... [en línea]. Disponible en: <https://estonocumple.wordpress.com/2014/09/24/preguntas-y-respuestas-sobre-normas-une-iso-en-armonizadas/>.

- [27] Norma ISO para Robots Colaborativos - infoPLC [en línea]. Disponible en: <https://www.infopl.net/actualidad-industrial/item/103207-iso-norma-ts15066-robots-colaborativos>.
- [28] Arribas, F. Normas técnicas en seguridad robótica [en línea]. 2017. Disponible en: [https://issga.xunta.es/export/sites/default/recursos/descargas/documentacion/material-formativo/relatorios/2017\\_05\\_CO\\_Industria\\_4.0\\_Arribas.pdf](https://issga.xunta.es/export/sites/default/recursos/descargas/documentacion/material-formativo/relatorios/2017_05_CO_Industria_4.0_Arribas.pdf)
- [29] Görnemann, O. ISO TS15066-ROBOTS COLABORATIVOS MITOS Y REALIDADES [en línea]. 2015. Disponible en: [http://www.fundacentro.gov.br/Arquivos/sis/EventoPortal/AnexoPalestraEvento/05\\_ISO\\_TS\\_15066\\_ES.pdf](http://www.fundacentro.gov.br/Arquivos/sis/EventoPortal/AnexoPalestraEvento/05_ISO_TS_15066_ES.pdf)
- [30] ISO - ISO/TC 299 - Robotics [en línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/committee/5915511.html>
- [31] Vaello, J.R. El relé de seguridad en máquinas. - YouTube [en línea]. 2018. Disponible en: [https://www.youtube.com/watch?v=tnO5pEY\\_S\\_k](https://www.youtube.com/watch?v=tnO5pEY_S_k)
- [32] Conector SCSI | Encuentre conectores | Arrow.com [en línea]. Disponible en: <https://www.arrow.com/es-mx/categories/connectors/io-connectors/connector-scsi>
- [33] Small Computer System Interface - Wikipedia, la enciclopedia libre [en línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Small\\_Computer\\_System\\_Interface](https://es.wikipedia.org/wiki/Small_Computer_System_Interface)
- [34] Robots MELFA – Serie RV - Mitsubishi Electric Factory Automation - Spain [en línea]. Disponible en: <https://es3a.mitsubishielectric.com/fa/es/products/rbt/robot/local/rv>
- [35] Robot articulado - Wikipedia, la enciclopedia libre [en línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Robot\\_articulado](https://es.wikipedia.org/wiki/Robot_articulado)
- [36] Datos técnicos - Mitsubishi Electric Factory Automation - Spain [en línea]. Disponible en: [https://es3a.mitsubishielectric.com/fa/es/shared/img/producttables/2013\\_145](https://es3a.mitsubishielectric.com/fa/es/shared/img/producttables/2013_145)
- [37] Festo Didactic. Guía\_rapida\_robot\_mitsubishi\_rv2-aj [en línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/jesugomez39750/guia-r-pidarobotmitsubishirv2aj>
- [38] Robot Mitsubishi RV-2AJ - labUno [en línea]. Disponible en: <https://sites.google.com/a/ing.austral.edu.ar/labuno/robot-mitsubishi-rv-2aj>
- [39] Tornil Sin, S. T2. *El robot manipulador industrial* [en línea]. 2019. Disponible en: [atenea.upc.edu](https://atenea.upc.edu)
- [40] 5.3 El sistema robótico. [en línea]. Disponible en: [http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr\\_0708/archivos/\\_15/Tema\\_5.3.htm](http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0708/archivos/_15/Tema_5.3.htm)
- [41] Controladores para robots - Robótica - Logismarket.mx [en línea]. Disponible en: <https://www.logismarket.com.mx/controladores-robots/1233068250-cp.html>

- [42] Festo Didactic. FMS50 Puesta en marcha Estación de Robot [en línea]. 2013. Disponible en: [https://pt.slideshare.net/roman\\_antonio33/presentacion-robot/5](https://pt.slideshare.net/roman_antonio33/presentacion-robot/5)
- [43] Mitsubishi Electric. Robots Training Manual For Beginners [en línea]. 2006. Disponible en: <https://slideplayer.com/slide/4343966/>
- [44] Mitsubishi Electric. *MELFA-Robots: RV-A RH-AH RP-AH*.
- [45] Comunicación serie - Wikipedia, la enciclopedia libre [en línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Comunicación\\_serie](https://es.wikipedia.org/wiki/Comunicación_serie)
- [46] Ethernet - Wikipedia, la enciclopedia libre [en línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Ethernet>
- [47] RS-232 - Wikipedia, la enciclopedia libre [en línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/RS-232>
- [48] Juan Gámiz, Javier Gámiz, P.P. (EEBE). *SICI\_Teoría.pdf* [en línea]. 2018. Disponible en: [atenea.upc.edu](http://atenea.upc.edu).
- [49] ISO - ISO/IEC 14776-454:2018 - Information technology — Small computer system interface (SCSI) — Part 454: SCSI Primary Commands - 4 (SPC-4) [en línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/70815.html>
- [50] RoHS - Wikipedia, la enciclopedia libre [en línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/RoHS>
- [51] Qué es el RoHS y por qué es importante [en línea]. Disponible en: <http://www.asiap.org/AsIAP/index.php/raee/300-articulos/3004-que-es-el-rohs-y-por-que-es-importante>
- [52] Bellido Díaz, M.J. Normas Básicas y Recomendaciones en el Diseño de PCBs [en línea]. 2015. Disponible en: <https://www.dte.us.es/docencia/etsii/gii-ic/laboratorio-de-desarrollo-hardware/temas/>.
- [53] Manzanares, M. *Prácticas de tecnología electrónica. Práctica PCB* [en línea]. 2018. Disponible en: [atenea.upc.edu](http://atenea.upc.edu).
- [54] Comisión Electrotécnica Internacional - Wikipedia, la enciclopedia libre [en línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Comisión\\_Electrotécnica\\_Internacional](https://es.wikipedia.org/wiki/Comisión_Electrotécnica_Internacional)
- [55] Barrera fotoeléctrica de seguridad. Definición y explicación - Pilz ES [en línea]. Disponible en: <https://www.pilz.com/es-ES/knowhow/lexicon/articles/072452>
- [56] Alfombra vs. escáner de seguridad - Seguridad y Vigilancia [en línea]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Seguridad/Articulos/133769-Alfombra-vs-escaner-de-seguridad.html>

- [57] Alfombra vs escáner de seguridad - Noticias de Envase en Alimarket, información económica sectorial [en línea]. Disponible en: <https://www.alimarket.es/envase/noticia/178439/alfombra-vs-escaner-de-seguridad>.
- [58] Protección de zonas con sensores bi- y tridimensionales - Pilz ES [en línea]. Disponible en: <https://www.pilz.com/es-ES/products/applications/area-guarding>
- [59] Relevador de seguridad eléctrico - Ingeniería Mecafenix [en línea]. Disponible en: <https://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/relevador-de-seguridad/>.
- [60] Relé de seguridad - Wikipedia, la enciclopedia libre [en línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Relé\\_de\\_seguridad](https://es.wikipedia.org/wiki/Relé_de_seguridad)
- [61] Contactos de guía forzosa - Pilz ES [en línea]. Disponible en: <https://www.pilz.com/es-ES/knowhow/lexicon/articles/072318>
- [62] S32B-3011BA | Dispositivos de protección optoelectrónicos | SICK [en línea]. Disponible en: <https://www.sick.com/es/es/dispositivos-de-proteccion-optoelectronicos/escaneres-laser-de-seguridad/s300-mini-standard/s32b-3011ba/p/p295744>
- [63] Lenguaje ladder - Wikipedia, la enciclopedia libre [en línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Lenguaje\\_ladder](https://es.wikipedia.org/wiki/Lenguaje_ladder)
- [64] Normas básicas (normas A+B): resumen - Pilz ES [en línea]. Disponible en: <https://www.pilz.com/es-ES/knowhow/law-standards-norms/iso-standards>
- [65] ¿Cuál es la diferencia entre normas A, B y C? - Pilz ES [en línea]. Disponible en: <https://www.pilz.com/es-ES/knowhow/faq/standards/articles/167667>
- [66] Tiempo de reacción de un PLC Siemens - PROGRAMACIÓN SIEMENS [en línea]. Disponible en: [https://programacionsiemens.com/tiempos-de-reaccion-de-un-plc-siemens/#Tiempos\\_de\\_ciclo\\_y\\_tiempos\\_de\\_reaccion](https://programacionsiemens.com/tiempos-de-reaccion-de-un-plc-siemens/#Tiempos_de_ciclo_y_tiempos_de_reaccion)
- [67] The PLC Tutor-What's response time? [en línea]. Disponible en: [https://home.isr.uc.pt/~lino/AIR/Arquivo/PLC\\_Tutor/restime.htm](https://home.isr.uc.pt/~lino/AIR/Arquivo/PLC_Tutor/restime.htm)

## Hojas de especificaciones y manuales de los dispositivos

- [1-1] Mitsubishi Electric. *Specifications Manual RV-1A / RV-2AJ Series*. 2002.
- [1-2] Sick AG. *Instrucciones de servicio UE10 2FG* [en línea]. 2016. Disponible en: <https://www.sick.com/ag/en/senscontrol-safe-control-solutions/safety-relays/ue10-2fg/ue10-2fg3d0/p/p91147>
- [1-3] SIEMENS. *Manual de sistema controlador programable S7-1200* [en línea]. 2012. Disponible en: <http://www.siemens.com/automation/>



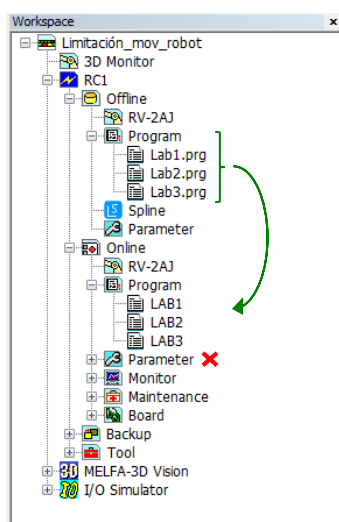
- [1-4] Phoenix Contact. *Cable para sensores/actuadores 1406104 Datasheet* [en línea]. 2019. EAN 4046356799454. Disponible en: <https://www.phoenixcontact.com/es/productos/1406104>
- [1-5] WERMA Signaltechnik GmbH. *LED Signal Tower Kompakt 37 Datasheet* [en línea]. 2013. Disponible en: [https://www.werma.com/es/s\\_c1006i2581/K37\\_cable\\_EM\\_24VAC/DC\\_GN/RD/69812075.html](https://www.werma.com/es/s_c1006i2581/K37_cable_EM_24VAC/DC_GN/RD/69812075.html)
- [1-6] MeanWell. EDR-120 series Datasheet [en línea]. 2020. Disponible en: <https://www.meanwell-web.com/en-gb/ac-dc-industrial-din-rail-power-supply-output-24v-edr--120--24>
- [1-7] Nidec. Nidec Series GMPG type 404.603 Datasheet [en línea]. Disponible en: <http://www.nidec.cz/pdf/404603.pdf>
- [1-8] NorComp. 111-YYY-213L001 series Datasheet [en línea]. 2015. Disponible en: <https://www.norcomp.net/series/111-series>
- [1-9] CuiDevices. TB004-508 Series Datasheet [en línea]. 2020. Disponible en: <https://www.cuidevices.com/product/interconnect/connectors/terminal-blocks/tb004-508-series>
- [1-10] Sick AG. UE10-2FG Product Datasheet [en línea]. 2020. Disponible en: <https://www.sick.com/UE10-2FG>
- [1-11] Sick AG. S32B-3011BA S300 Mini Standard Datasheet [en línea]. 2020. Disponible en: [https://www.sick.com/S300\\_Mini\\_Standard](https://www.sick.com/S300_Mini_Standard)
- [1-12] OMRON Corporation. Relay G2RV-SR/G3RV-SR Datasheet [en línea]. 2018. Disponible en: <https://industrial.omron.es/es/products/g2rv>
- [1-13] Phoenix Contact. Relay Module RIF-0-RPT-24DC/1-2903361 Datasheet [en línea]. 2019. ISBN 4046356731997. Disponible en: <https://www.phoenixcontact.com/gb/products/2903361>
- [1-14] OMRON Corporation. Omron E3FZ/E3FR Datasheet [en línea]. 2008. Disponible en: [https://assets.omron.eu/downloads/datasheet/en/v2/e55e\\_e3fz\\_e3fr\\_photoelectric\\_sensor\\_short\\_m18\\_housing\\_datasheet\\_en.pdf](https://assets.omron.eu/downloads/datasheet/en/v2/e55e_e3fz_e3fr_photoelectric_sensor_short_m18_housing_datasheet_en.pdf)
- [1-15] OMRON Corporation. *Safety Light Curtain ( Type 4 ) F3SJ Cat.* [en línea]. 2017. Disponible en: <https://usermanual.wiki/Pdf/552406Attachmenturl.2005069633/view>
- [1-16] Sick AG. *Instrucciones de servicio S300 Mini Sicherheits-Laserscanner* [en línea]. 2017. Disponible en: <https://www.sick.com/es/es/dispositivos-de-proteccion-optoelectronicos/escaneres-laser-de-seguridad/s300-mini-standard/s32b-3011ba/p/p295744>
- [1-17] OMRON Corporation. *F3SJ Series Datasheet* [en línea]. 2019. Disponible en: <http://www.ia.omron.com/products/family/1581/download/catalog.html>



## Anexo A. Protocolos de actuación para la celda

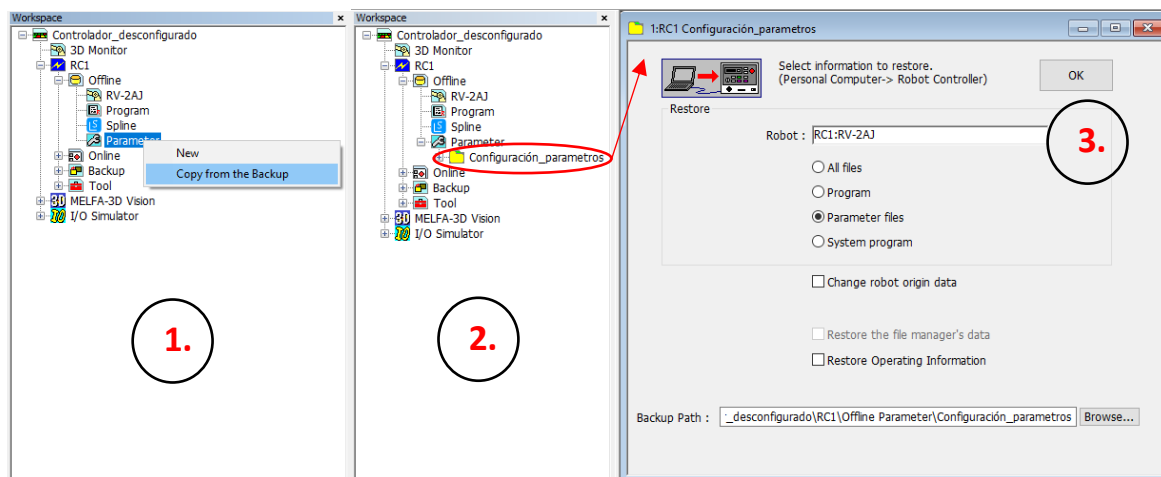
Todas las medidas de seguridad implementadas en el diseño de la celda, derivadas de la aplicación de las normativas, no tendrían sentido sin unos protocolos de actuación para las personas u operadores del sistema. Estos protocolos se hacen aún más necesarios si se considera el uso de la celda, ya que al utilizarse para prácticas docentes, los operadores de la celda siempre serán diferentes.

En primer lugar, y referente a la configuración del controlador, nunca se deberán modificar los parámetros correspondientes al origen de coordenadas del robot, a las limitaciones de movimiento y a la configuración de las E/S dedicadas. En todo caso, y si se detectara la desconfiguración de alguno de ellos, se podrían modificar para dejarlos tal y como se marca en este trabajo. Con lo cual, cuando un alumno quiera cargar su programa en el robot, lo único que deberá hacer es abrir su programa en el software RT Toolbox2 y arrastrarlo al menú *online* → *program*, y en ninguno de los casos, modificar nada del menú *online* → *parameter*.



**Figura A.1.** Árbol del espacio de trabajo del software RT Toolbox 2 de Mitsubishi

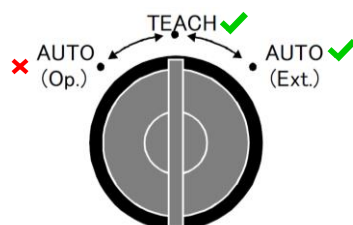
Con el objetivo de simplificar y asegurar la correcta modificación de los parámetros en caso de su desconfiguración, se ha creado una copia de seguridad (*backup*) que deberá ser cargada en el controlador cuando se detecte un mal funcionamiento de los mismos. Para ello, se tendrá que ir al menú *offline* → *parameter* y clicar el botón derecho del ratón para seleccionar la opción *copy from the backup*. Después, habrá que seleccionar el fichero *backup* con la configuración de parámetros correcta, y una vez que aparezca en el menú *offline* → *parameter*, clicar sobre él para cargarlo en el controlador. Seguidamente, y como último paso, aparecerá una ventana en la que se deberá marcar *parameter files* y clicar *OK*.



**Figura A.2.** Pasos a seguir para cargar el fichero *backup* en el controlador por medio del software RT Toolbox 2

Como apunte a destacar, decir que la generación del fichero *backup* con la configuración de parámetros, se hace automáticamente a través del menú *backup* → *parameter* (contraído en las figuras A.1. y A.2.), y al clicar sobre él, solo hay que especificar en qué carpeta se guardará.

Respecto a los modos de operación del controlador, siempre deberá estar seleccionado el modo AUTO (externo), a fin de permitir la operación del robot mediante el ordenador y las E/S dedicadas; y únicamente se podrá cambiar al modo TEACH (manual), cuando se quiera mover el robot manualmente. En ninguno de los casos se podrá operar el robot en el modo AUTO (controlador), ya que se inhabilitarían las E/S dedicadas, y por lo tanto, la función de parada de seguridad iniciada por la cortina fotoeléctrica quedaría desactivada. Con tal de asegurar que esto no pase, se quitará la llave del selector del controlador y se dejará bloqueado en la posición AUTO (externo), haciendo así que no se pueda cambiar el modo de operación libremente. La llave, solamente la podrá tener una persona responsable, y será la única autorizada para poder cambiar el modo de operación del robot. En el caso de las prácticas docentes, esa persona será el profesor, al cual los alumnos deberán pedir permiso para poder cambiar el modo de operación a TEACH (manual). En el caso de que alguna persona externa requiera de la llave para realizar alguna operación, se le deberá explicar el comportamiento del robot y de las seguridades en los diferentes modos de operación.



**Figura A.3.** Detalle del selector de llave del controlador y posiciones de los modos permitidos



## Anexo B. Tabla resumen de la normativa aplicada

A lo largo de la memoria se han ido referenciando diferentes normativas más allá de las explicadas en el apartado 3. Es por ello, que en este anexo se presenta una tabla resumen con todas las normas aplicadas en el diseño de la celda y el título de las mismas. Asimismo, también se muestra un esquema extraído de la norma UNE-ISO 10218-2:2011, donde se puede ver la relación existente entre las diferentes normativas aplicadas.

Normativas aplicadas en el diseño de la celda		
Tipo	Norma	Título
B	UNE-ISO 14120	Seguridad de las máquinas. Resguardos. Requisitos generales para el diseño y construcción de resguardos fijos y móviles.
B	UNE-ISO 13857	Seguridad de las máquinas. Distancias de seguridad para impedir que se alcancen zonas peligrosas con los miembros superiores e inferiores
B	UNE-ISO 13849	Seguridad de las máquinas. Partes de los sistemas de mando relativas a seguridad.
B	UNE-ISO 13855	Seguridad de las máquinas. Posicionamiento de los protectores con respecto a la velocidad de aproximación de partes del cuerpo humano.
B	IEC 60204-1	Seguridad de las máquinas. Equipo eléctrico de las máquinas. Parte 1: Requisitos generales
B	IEC 61496-1	Seguridad de las máquinas. Equipos de protección electrosensibles. Parte 1: Requisitos generales y ensayos.
C	UNE-ISO 10218-2	Robots y dispositivos robóticos. Requisitos de seguridad para robots industriales. Parte 2: Sistemas robot e integración.

**Tabla B.1.** Resumen de las normativas aplicadas en el diseño (Fuentes [2] [12] [13] [14] [15] [16] [17])

Además de las normas mostradas en la tabla, hay otras normas que han sido citadas pero que no han sido aplicadas en el diseño de la celda, como son: la UNE-ISO 10218-1, dedicada solo al robot y su sistema controlador; la ISO/TS 15066, para robots colaborativos; o la UNE-ISO 13856; destinada a equipos de protección sensibles a la presión. Algunas de estas normas, y todas las de la tabla anterior, se podrán ver en el esquema que se adjunta en la siguiente página.

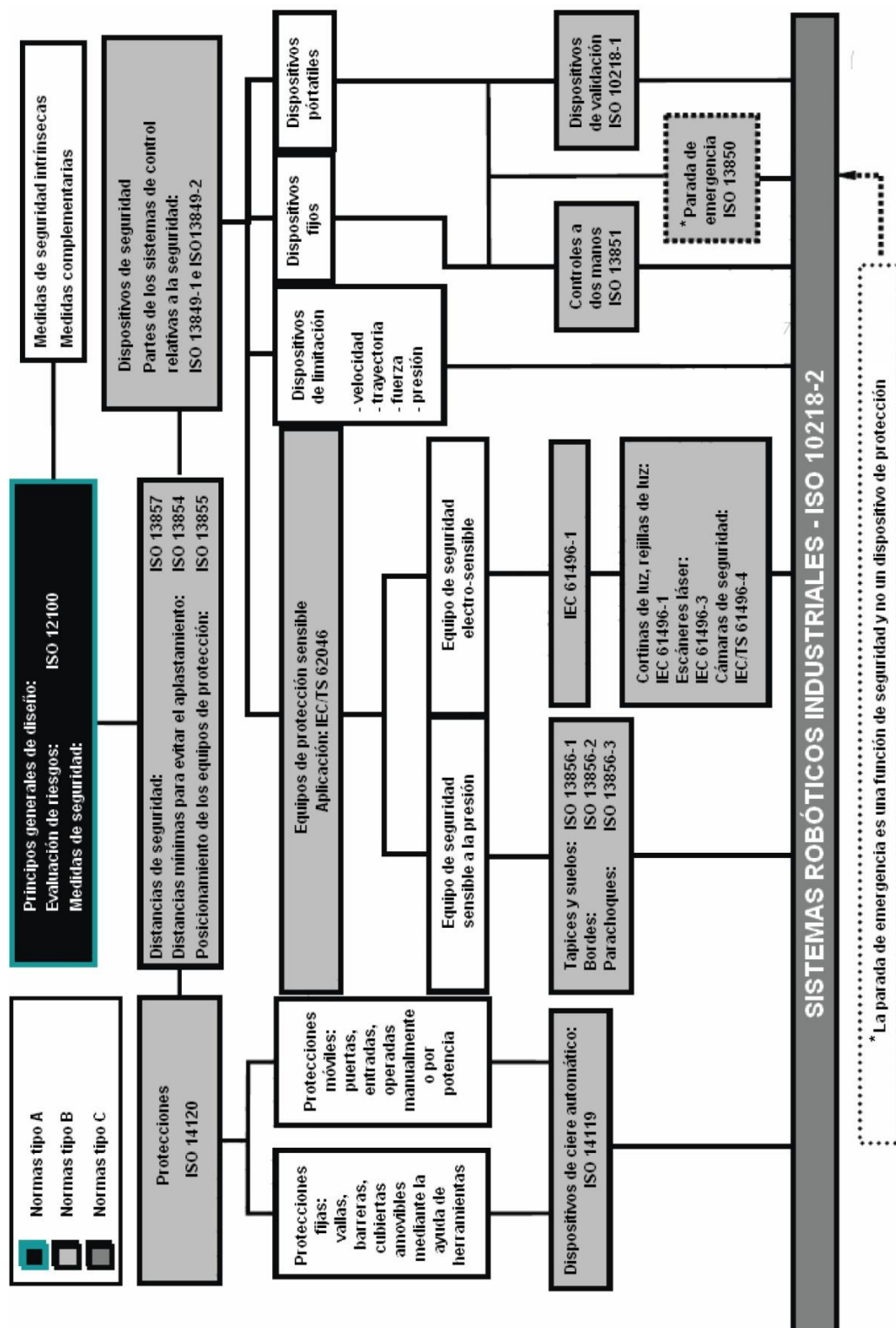


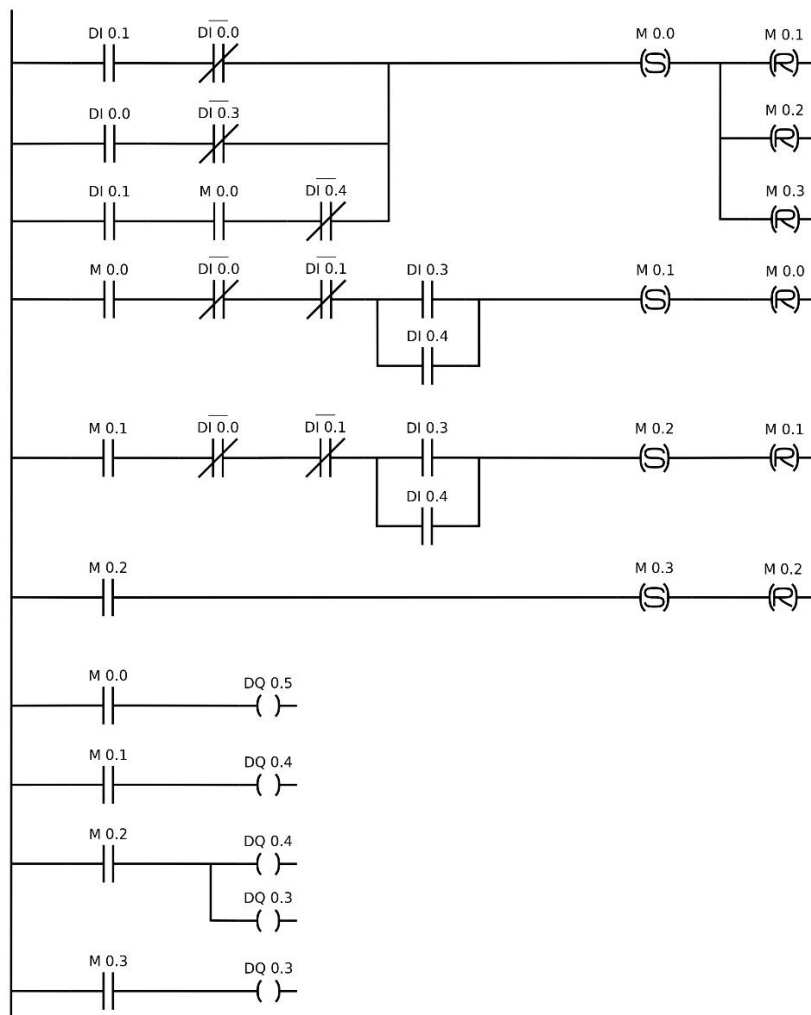
Figura B.1. Relación de normas para los sistemas robóticos industriales (Fuente [2]. Anexo B (pág. 57))

## Anexo C. Código de programación del PLC

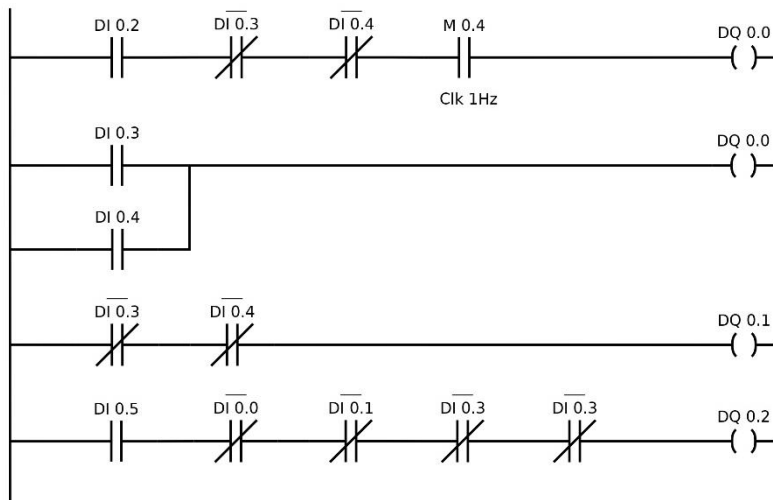
Relación de entradas y salidas del PLC, y marcas programadas:

<b>DI 0.0-</b> Monitorización escáner	<b>DQ 0.0-</b> Activación luz roja baliza
<b>DI 0.1-</b> Monitorización cortina	<b>DQ 0.1-</b> Activación luz verde baliza
<b>DI 0.2-</b> CA (campo aviso escáner)	<b>DQ 0.2-</b> Accionamiento del motor
<b>DI 0.3-</b> Estado del robot (parada escáner)	<b>DQ 0.3-</b> Activación función START
<b>DI 0.4-</b> Estado del robot (parada cortina)	<b>DQ 0.4-</b> Activación función IOENA
<b>DI 0.5-</b> Accionamiento del motor (robot)	<b>DQ 0.5-</b> Activación función STOP
<b>M 0.0-</b> Paso activación señal STOP	
<b>M 0.1-</b> Paso activación señal IOENA	
<b>M 0.2-</b> Paso activación señales START e IOENA	
<b>M 0.3-</b> Paso activación señal START	
<b>M 0.4-</b> Marca de ciclo 1Hz	

Secuencia de parada y puesta en marcha del robot (la parada iniciada por el escáner tiene mayor grado de emergencia). Casos: activación cortina o diferencia entre peticiones de seguridad y estado del robot:



Activación de los leds de la baliza y control del accionamiento del motor:

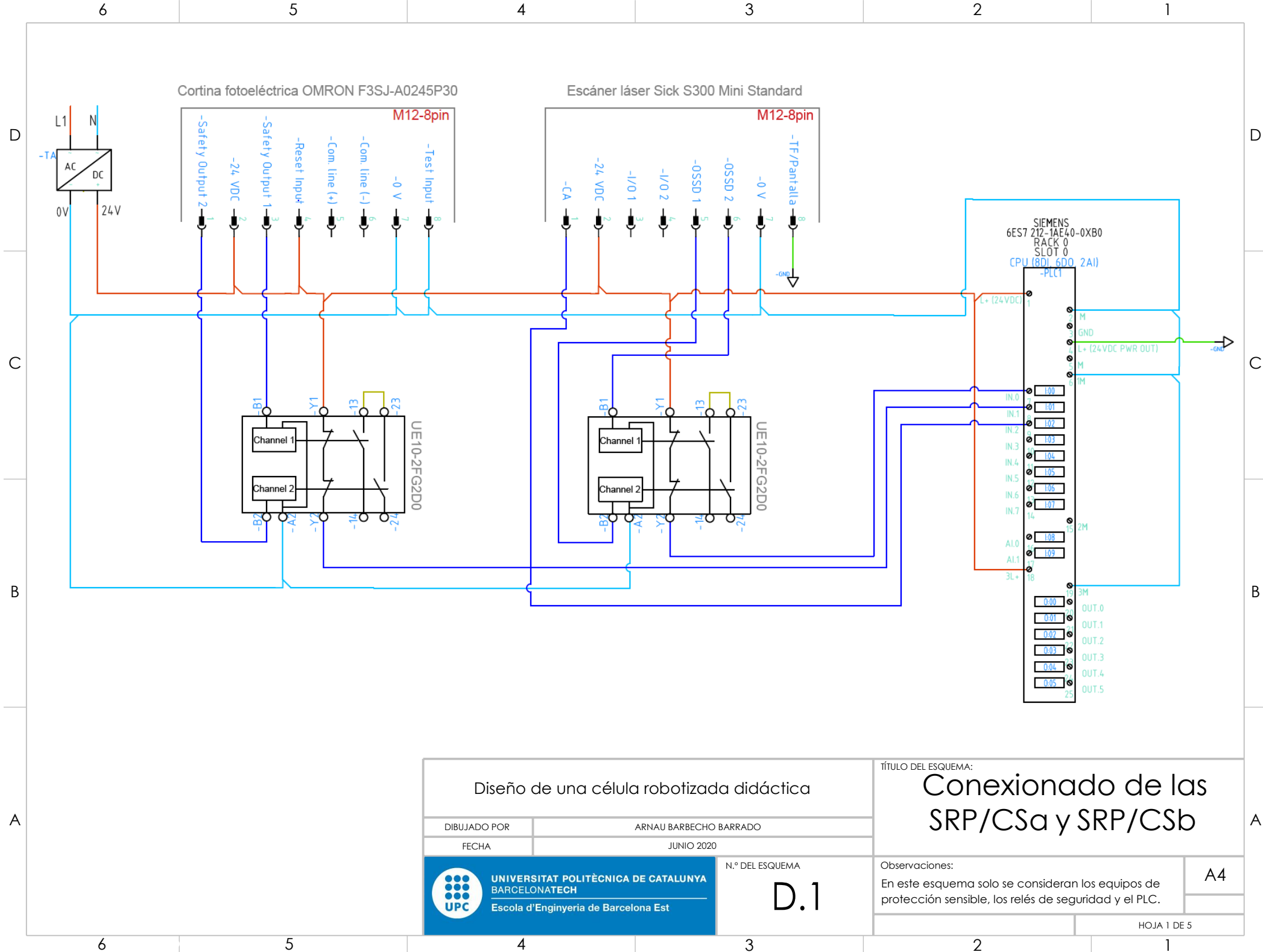


## **Anexo D. Esquemas eléctricos de la celda diseñada**

En el siguiente anexo se presentan todos los esquemas eléctricos vistos a lo largo la memoria, a continuación se adjunta el listado y numeración de los diferentes esquemas:

- D.1** - Conexionado de las SRP/CS<sub>a</sub> y SRP/CS<sub>b</sub>
- D.2** - Conexionado de la cortina fotoeléctrica
- D.3** - Conexionado del escáner láser
- D.4** - Conexionado de la baliza de señalización
- D.5** - Conexionado del motor de la cinta y los sensores

*Todos los esquemas han sido realizados con el software Autodesk Electrical.*



## Diseño de una célula robotizada didáctica

DIBUJADO POR

ARNAU BARBECHO BARRADO

FECHA

JUNIO 2020



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

N.º DEL ESQUEMA

D.1

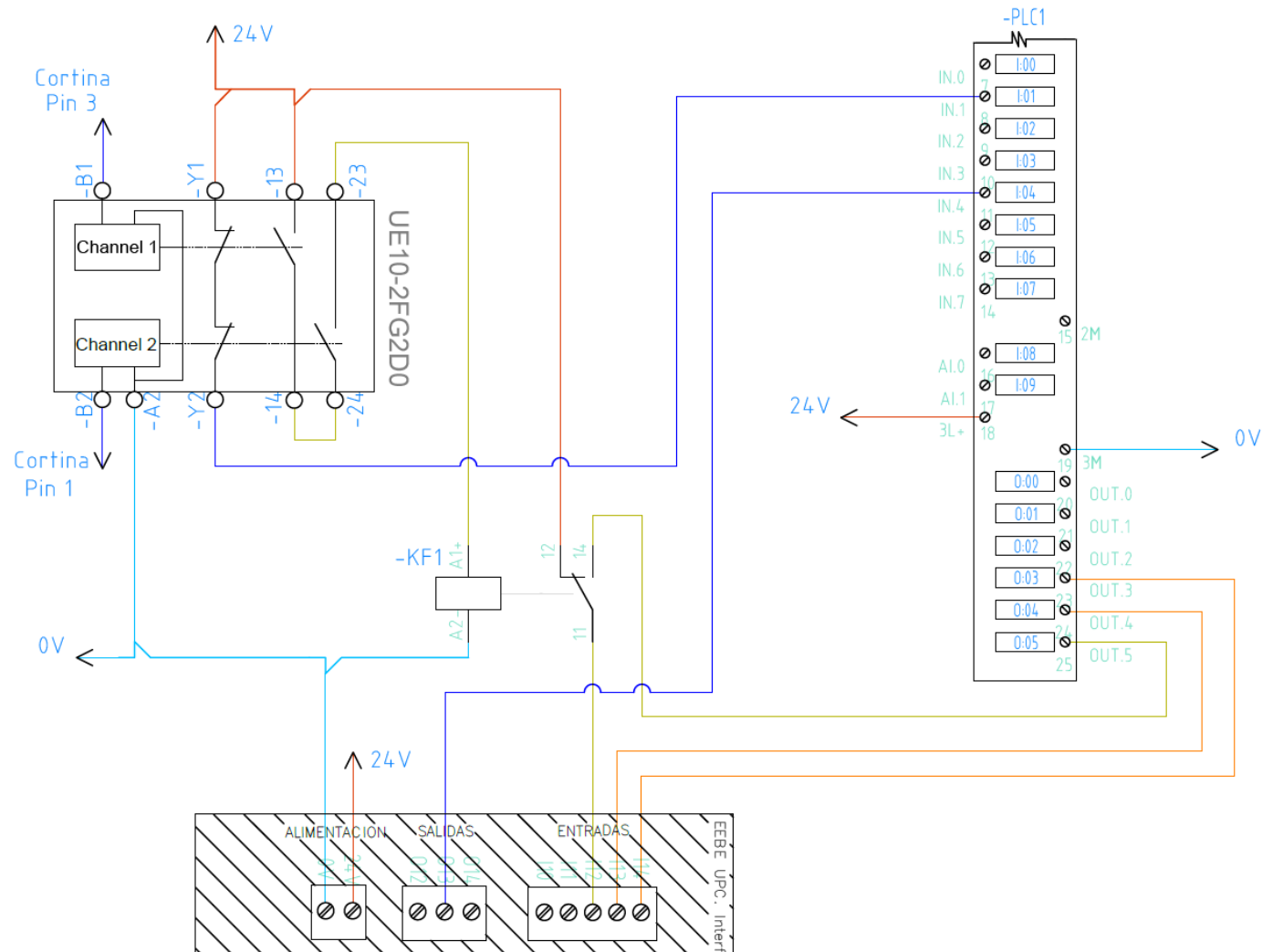
TÍTULO DEL ESQUEMA:

# Conexión de las SRP/CSa y SRP/CSb

Observaciones:

En este esquema solo se consideran los equipos de protección sensible, los relés de seguridad y el PLC.

A4



## Diseño de una célula robotizada didáctica

DIBUJADO POR

ARNAU BARBECHO BARRADO

FECHA

JUNIO 2020



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

N.º DEL ESQUEMA

D.2

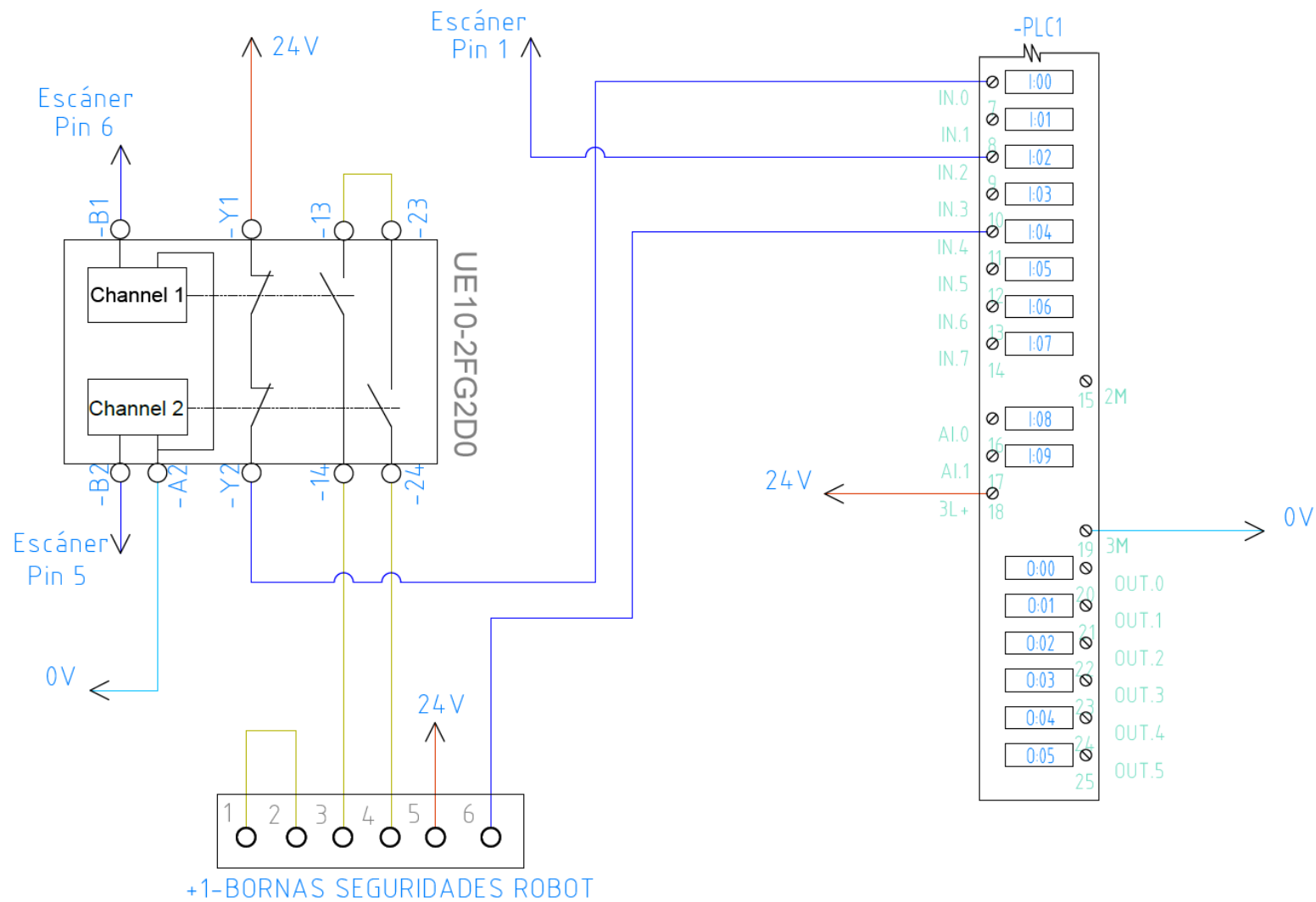
TÍTULO DEL ESQUEMA:

## Conexión de la cortina fotoeléctrica

Observaciones:

Conexión llevada a cabo a través del PLC y las E/S dedicadas. Resto de conexiones del PLC siguen igual.

A4



## Diseño de una célula robotizada didáctica

DIBUJADO POR

ARNAU BARBECHO BARRADO

FECHA

JUNIO 2020



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

N.º DEL ESQUEMA

D.3

TÍTULO DEL ESQUEMA:

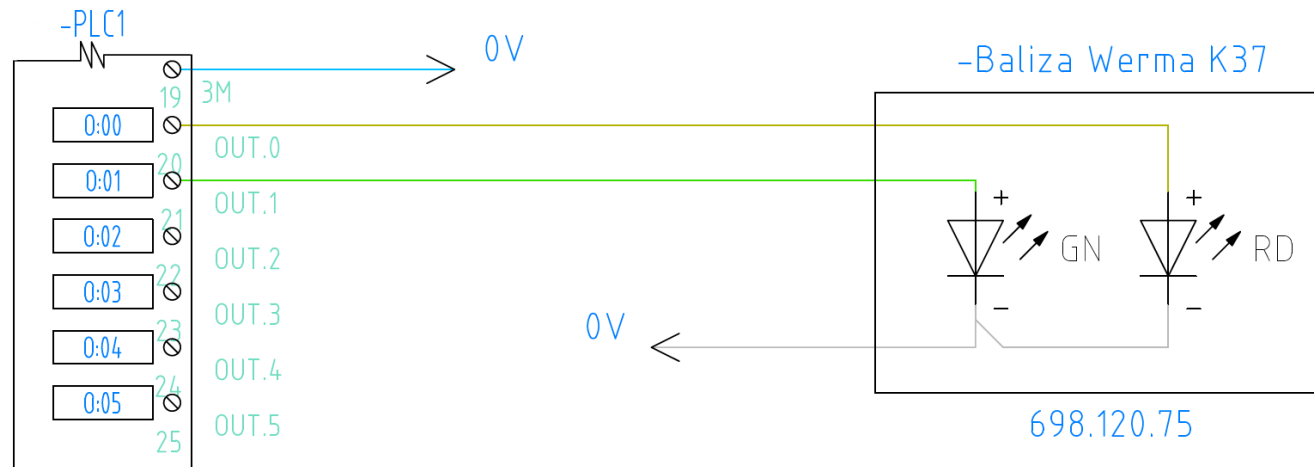
## Conexión del escáner láser


Observaciones:

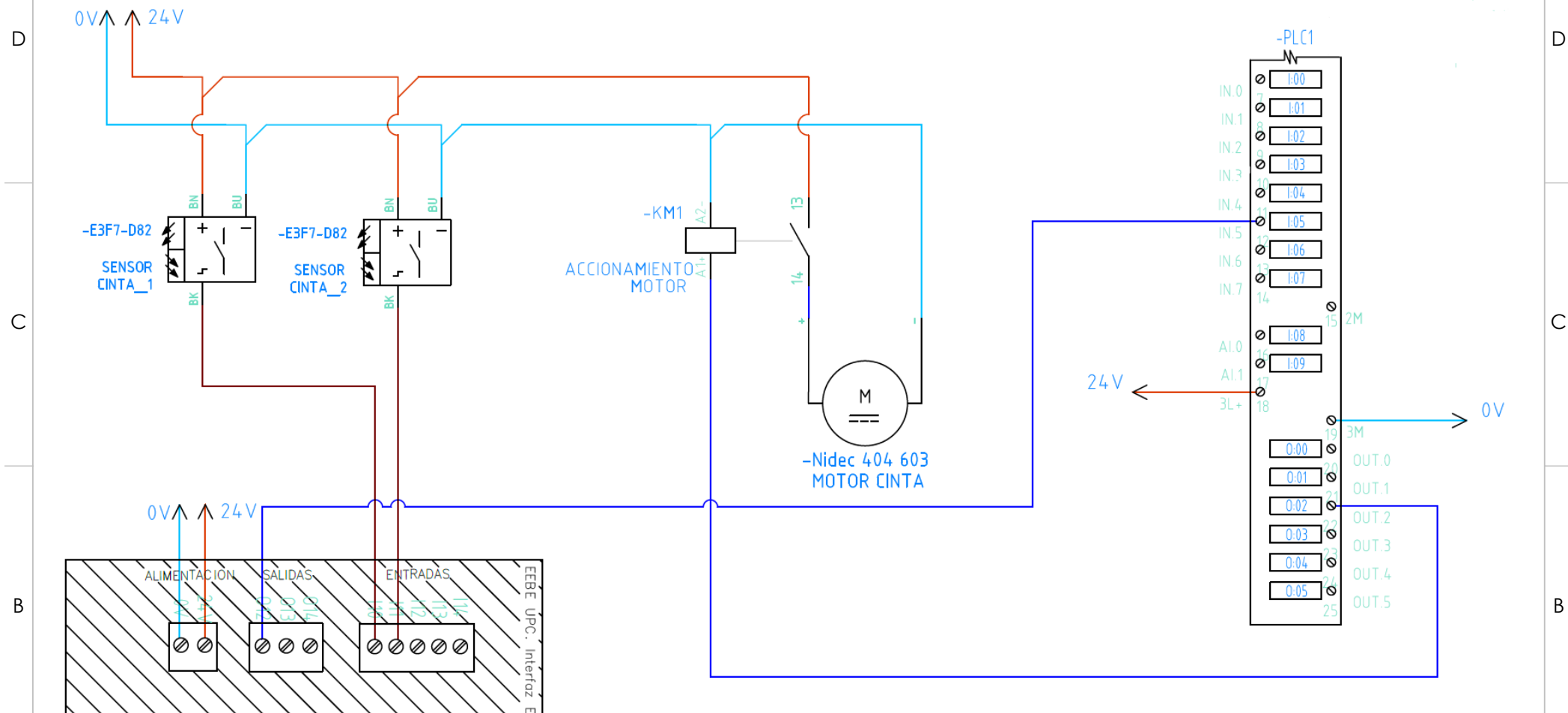
Conexión llevada a cabo a través del PLC y las E/S de seguridad. Resto de conexiones del PLC siguen igual.

A4





Diseño de una célula robotizada didáctica		TÍTULO DEL ESQUEMA: <b>Conexión de la baliza de señalización</b>	
DIBUJADO POR	ARNAU BARBECHO BARRADO		
FECHA	JUNIO 2020		
 <b>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA</b> <b>BARCELONATECH</b> Escola d'Enginyeria de Barcelona Est		N.º DEL ESQUEMA <b>D.4</b>	Observaciones: Conexión llevada a cabo a través de las salidas del PLC. Resto de conexiones del PLC siguen igual.
		A4 HOJA 4 DE 5	



## Diseño de una célula robotizada didáctica

DIBUJADO POR

ARNAU BARBECHO BARRADO

FECHA

JUNIO 2020



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

N.º DEL ESQUEMA

D.5

TÍTULO DEL ESQUEMA:

## Conexión del motor de la cinta y los sensores

Observaciones:

Conexión a través de las E/S externas del robot y el PLC. Resto de conexiones del PLC y PCB siguen igual.

A4

## **Anexo E. Planos de la celda 3D diseñada**

En este último anexo se presentan los planos de la celda 3D diseñada, donde se podrán observar diferentes cuestiones comentadas a lo largo de la memoria y una vista general del resultado del diseño. De la misma forma que para los esquemas eléctricos, a continuación se adjunta el listado y numeración de los diferentes planos adjuntados:

**E.1** - Vista general de la celda RV-2AJ (escala 1:20)

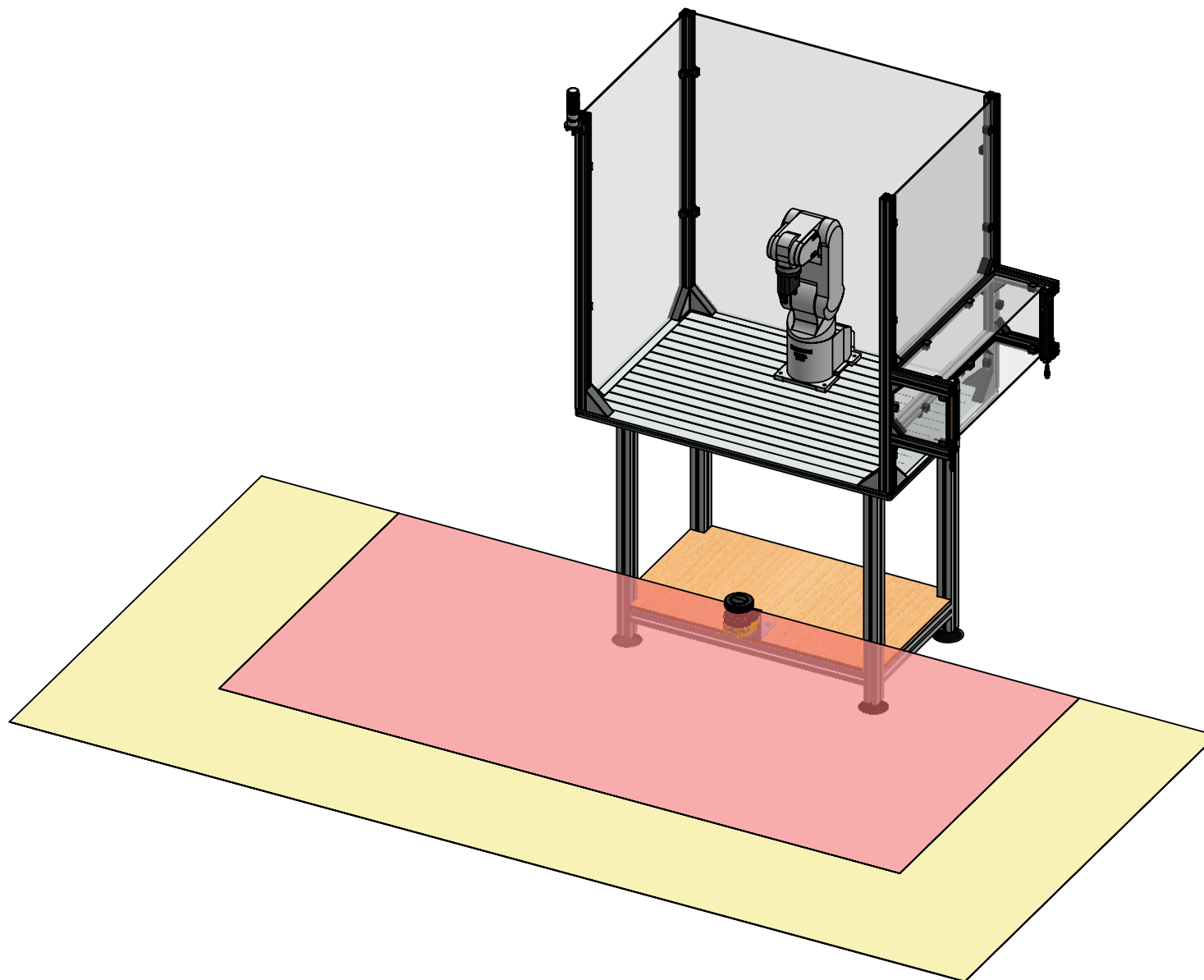
**E.2** - Medidas generales de la celda (escala 1:20)

**E.3** - Instalación de la cortina fotoeléctrica (escala 1:10)

**E.4** - Soporte para el escáner láser (escala 1:2)

**E.5** - Instalación de la baliza de señalización (escala 1:2)

*Todos los modelos 3D y respectivos planos han sido realizados con el software Solidworks*



# Diseño de una célula robotizada didáctica

DIBUJADO POR

ARNAU BARBECHO BARRADO

FECHA

JUNIO 2020



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

N.º DE PLANO

E.1

TÍTULO PLANO:

## Vista general de la celda RV-2AJ

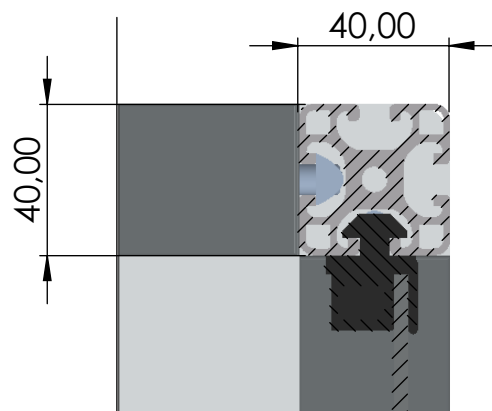
Observaciones:

Además de la celda se puede observar el campo  
de detección del escáner.

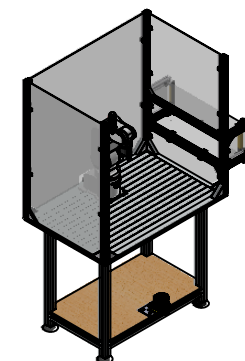
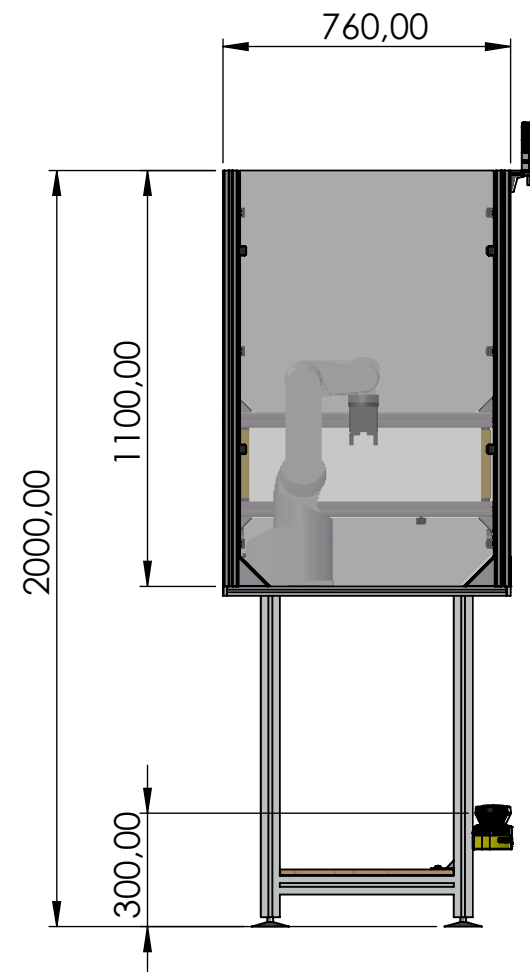
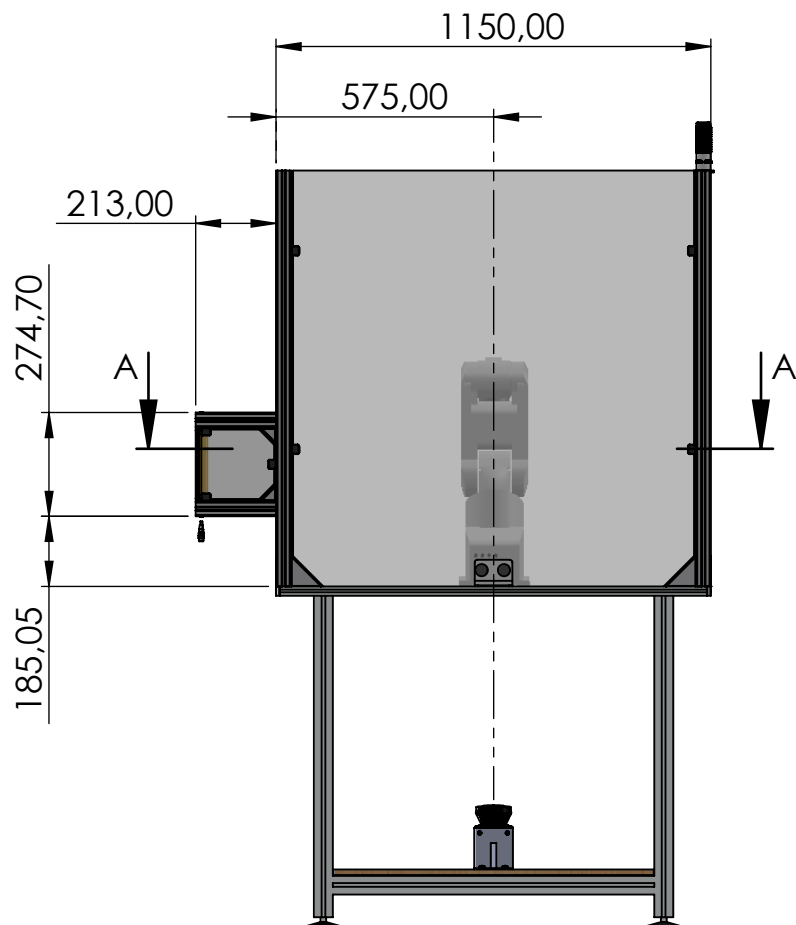
A4

ESCALA 1:20

HOJA 1 DE 5



SECCIÓN A-A. Detalle de escuadra y brida  
ESCALA 1 : 2



## Diseño de una célula robotizada didáctica

DIBUJADO POR

ARNAU BARBECHO BARRADO

FECHA

JUNIO 2020



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

N.º DE PLANO

E.2

TÍTULO PLANO:

# Medidas generales de la celda

Observaciones:

Los kits de esquadra utilizados incorporan su propia tornillería y por eso no se muestra

A4

ESCALA 1:20

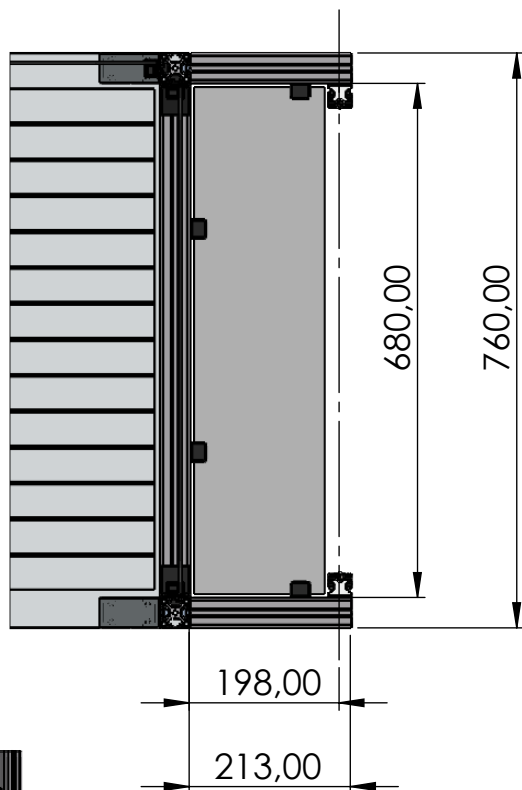
HOJA 2 DE 5

D

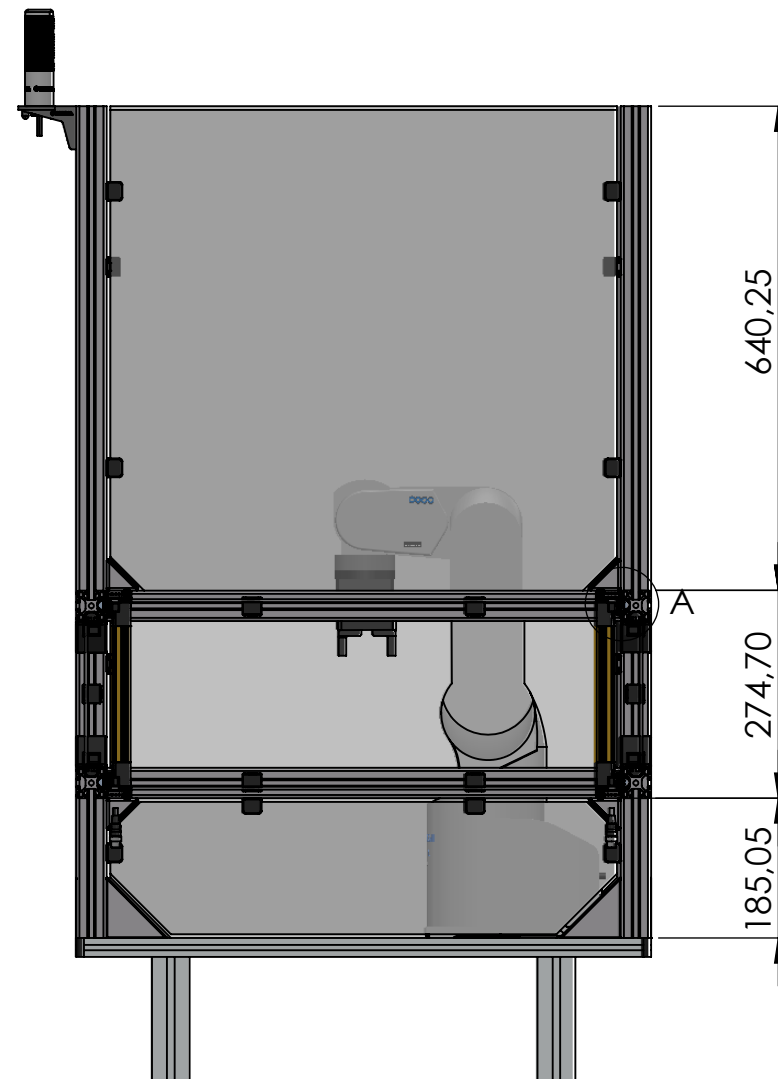
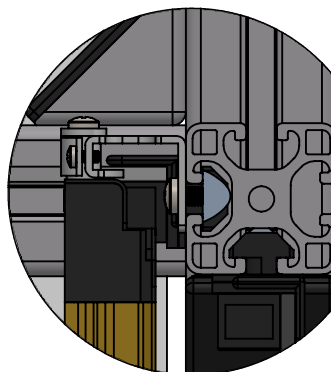
C

B

A



DETALLE A  
ESCALA 1 : 2



D

C

B

A

## Diseño de una célula robotizada didáctica

DIBUJADO POR

ARNAU BARBECHO BARRADO

FECHA

JUNIO 2020



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

N.º DE PLANO

E.3

TÍTULO PLANO:

## Instalación de la cortina fotoeléctrica

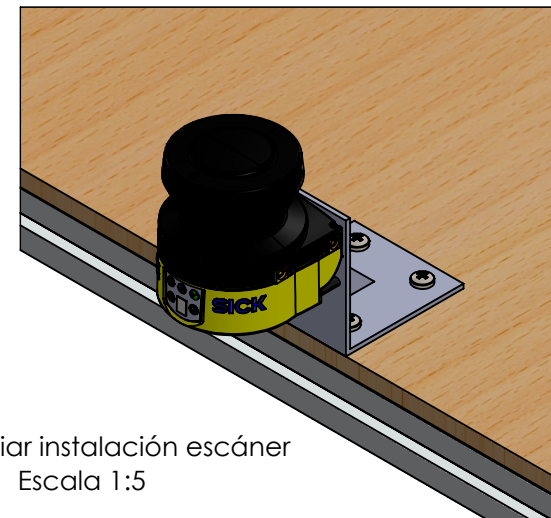
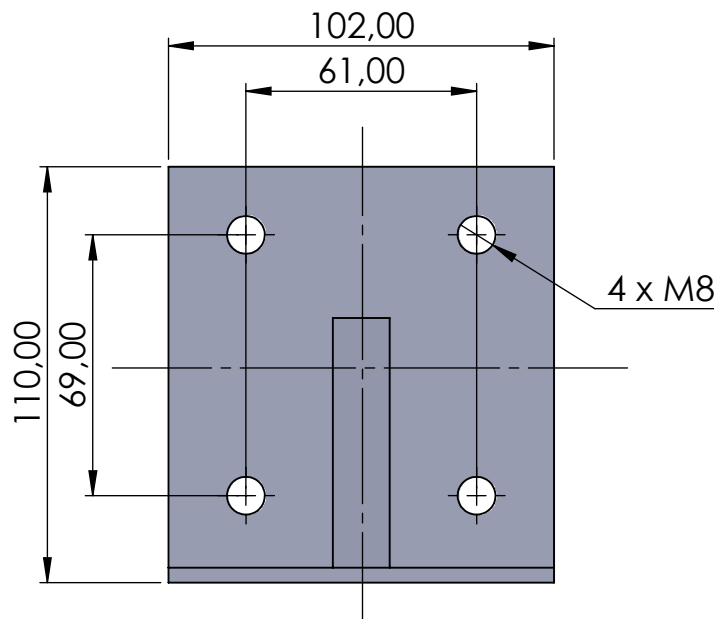
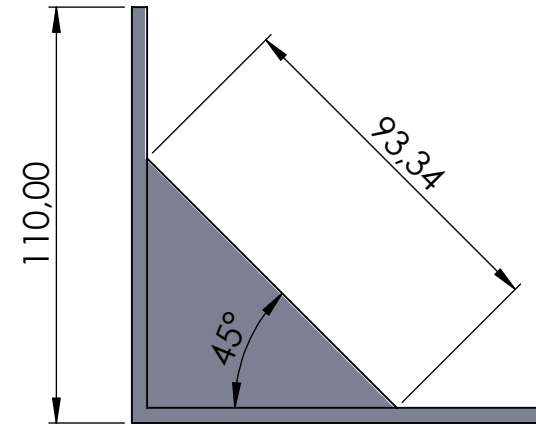
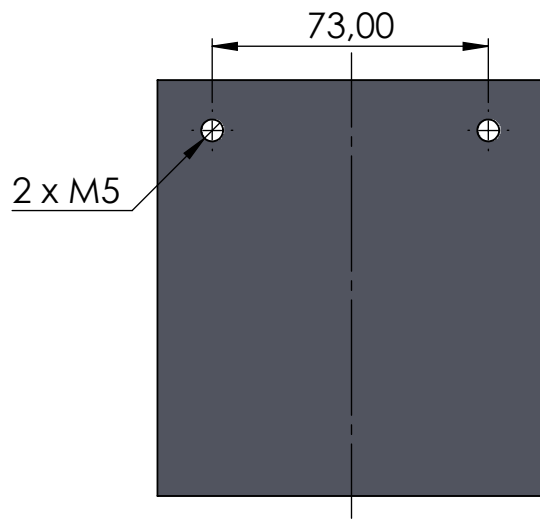
Observaciones:

El detalle A se repite 4 veces, en cada sujeción de la cortina con su tornillo M5x12 y tuerca cojeada

A4

ESCALA 1:10

HOJA 3 DE 5



Vista auxiliar instalación escáner  
Escala 1:5

Diseño de una célula robotizada didáctica

DIBUJADO POR

ARNAU BARBECHO BARRADO

FECHA

JUNIO 2020



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

N.º DE PLANO

E.4

TÍTULO PLANO:

Soporte para el escáner  
láser

Observaciones:

La instalación del escáner se lleva a cabo como se muestra en la vista auxiliar y en los planos E.1 - E.2

A4

ESCALA 1:2

HOJA 4 DE 5

6

5

4

3

2

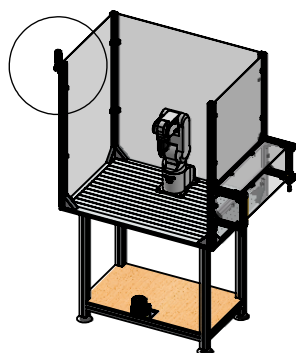
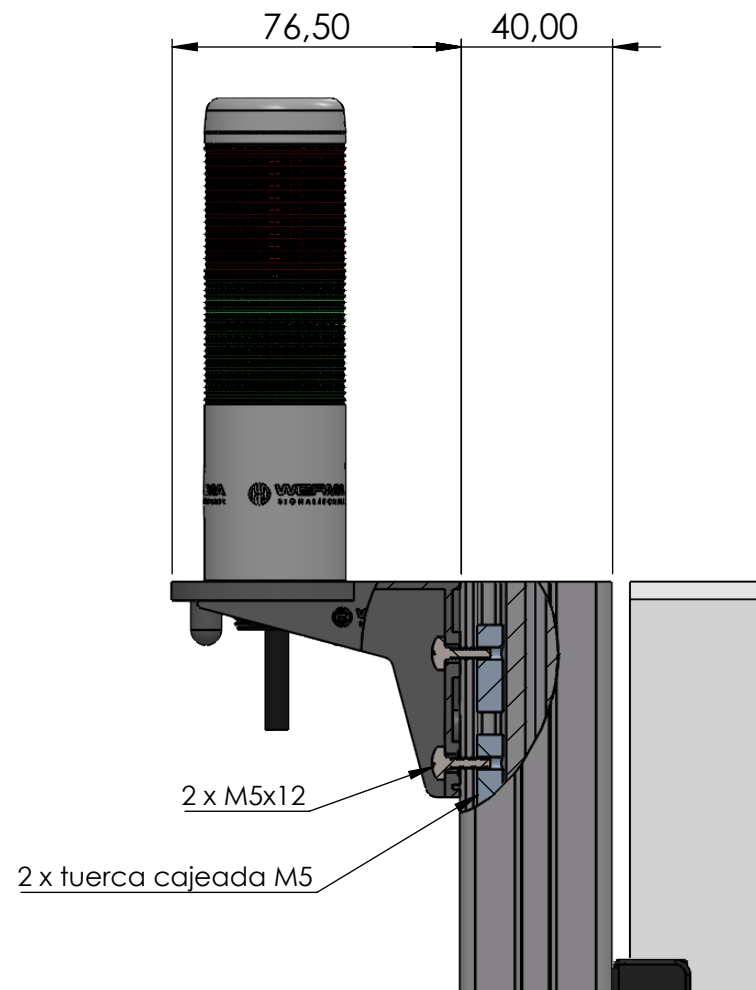
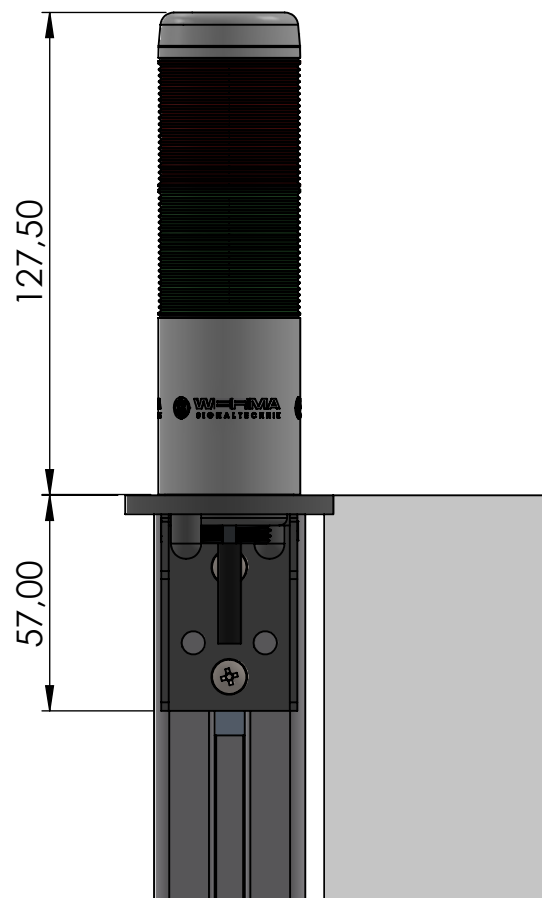
1

D

C

B

A



Diseño de una célula robotizada didáctica

DIBUJADO POR

ARNAU BARBECHO BARRADO

FECHA

JUNIO 2020



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

N.º DE PLANO

E.5

TÍTULO PLANO:

Instalación baliza de  
señalización

Observaciones:

--

A4

ESCALA 1:2

HOJA 5 DE 5

4

3

2

1